



Caracterização e Avaliação do Recurso Hidromineral das Quenturas, Vulcão das Furnas, Ilha de S.Miguel (Açores)

Ana Rita Regalo Freitas

Mestrado em Geologia Aplicada
Especialização em Hidrogeologia

Trabalho de Projeto orientado por:
Professora Doutora Maria do Rosário Carvalho
Professor Doutor João Carlos Carreiro Nunes

AGRADECIMENTOS

No decorrer da elaboração deste Trabalho de Projeto foram muitas as pessoas e entidades que contribuíram, de uma forma ou outra, para a sua execução. Assim, agradeço primeiramente aos meus orientadores, Professora Doutora Maria do Rosário Carvalho e Professor Doutor João Carlos Nunes, pela ajuda e disponibilidade, quer a nível dos trabalhos de campo como de gabinete, durante os quais a sua orientação foi um fator de elevada importância.

Ao INOVA – Instituto de Inovação Tecnológica dos Açores, por todas as facilidades concedidas a nível da cedência de informação e realização de análises físico-químicas, designadamente no âmbito do Projeto i-Termal – Inovação em Termalismo & Turismo Termal, referência ACORES-03-0853-FEDER-000015, financiado pelo Programa PO AÇORES2020 e Governo dos Açores (SREAT).

Ao projeto da FCT referência UID/GEO/50019/2013 – Instituto Dom Luiz.

À DRAIC (Direção Regional de Apoio ao Investimento e à Competitividade), pelo fornecimento de documentos relativos à “Concessão mineromedicinal da Estância Termal das Furnas” e à Secretaria Regional da Ciência e Tecnologia (SRCTE/DSC) por fornecer o ortofotomapa do Vulcão das Furnas.

Ao professor José Madeira, pela informação que me facultou na fase inicial deste projeto.

Ao Furnas Boutique Hotel – Thermal & Spa, pela cedência do espaço para instalação de um recipiente para colheita de água de precipitação.

Aos proprietários do empreendimento da “Poça da Dona Beija”, por permitirem recolha de amostra e por facultarem acesso à ribeira através da sua propriedade.

À ASTA Atlântida – Sociedade de Turismo e Animação, S.A., pelo fornecimento de documentos relacionados com o plano de exploração da captação “Quenturas”.

À Norma Açores, S.A., pelo fornecimento de informações relativas ao Estudo de Impacte Ambiental do Aproveitamento Hidroelétrico Reversível da Lagoa das Furnas.

Aos proprietários de terrenos privados que forneceram acesso aos mesmos para reconhecimento e colheita de amostra, nomeadamente no que toca às nascentes da Água da Helena, da Fonte da Camarça e dos Banhos da Câmara da Povoação IV e V, bem como aos proprietários da “Mountain Dream”, onde foi instalado um recipiente para colheita de amostra de água de precipitação.

Ao colega João Paulo pelo auxílio nas campanhas de amostragem e ao colega Henrique pela disponibilidade em ajudar, facultando dados bibliográficos, acompanhando campanhas de amostragem e oferecendo o seu conhecimento na fase de análise de dados.

Por fim, e numa nota mais pessoal, gostaria de agradecer à Cristina, à Daniela, à Filipa, à Liliana, à Mariana e à Soraia por toda a paciência que tiveram comigo neste processo, mostrando-se sempre disponíveis para me ouvir e auxiliar. E porque os últimos são sempre os primeiros, quero agradecer aos meus pais, sem os quais nada disto seria possível, pela paciência e disponibilidade, que mesmo estando longe, tentaram ajudar-me como se estivessem perto.

A todos, o meu muito obrigado.

RESUMO

A ilha de São Miguel, e em particular a região das Furnas, têm sido alvo de diversos estudos desde o século XVI, em parte devido aos fenómenos de termalismo que aqui ocorrem e à forma como afetam as populações, nomeadamente no que toca à utilização destas águas para fins terapêuticos e de lazer. A ocorrência de nascentes de água mineral e termal é um fenómeno conhecido desta região, cuja origem está associada a fenómenos de carácter vulcânico e à existência de sistemas hidrotermais superficiais ou profundos, bem como à interação entre ambos. A variabilidade composicional das águas do Vulcão das Furnas traduz-se no aparecimento de águas frias, com maior ou menor componente gasocarbónica, águas termais ácidas e básicas e fumarolas, todas no interior da Caldeira do Vulcão das Furnas.

Dada a importância destes recursos minerais foi demarcada uma concessão hidromineral, designada por “Concessão Mineromedicinal Estância Termal das Furnas”, que englobava, em 1964, uma área de 50 hectares e trinta e três nascentes mineromedicinais, cuja licença de exploração foi atribuída à antiga Junta Geral. Entre estas trinta e três está contemplada a nascente das Quenturas (ou da Água Férrea das Quenturas), que atualmente se encontra captada e é utilizada no abastecimento do Furnas Boutique Hotel – Thermal & Spa, localizado nas suas imediações.

O objetivo do presente trabalho é promover um conhecimento mais aprofundado do recurso hidromineral das Quenturas, quer quantitativo, quer qualitativo, por forma a contribuir para a correta gestão do mesmo. Para tal procedeu-se a uma atualização dos dados da “Concessão Mineromedicinal Estância Termal das Furnas”, com levantamento e amostragem das diversas nascentes que dela fazem parte atualmente, com vista ao estudo geoquímico e isotópico das mesmas. O estudo do comportamento das nascentes localizadas na área envolvente da “Concessão Mineromedicinal Estância Termal das Furnas” permite melhor compreender o aquífero termal associado ao recurso hidromineral das Quenturas.

A Caldeira do Vulcão das Furnas é dotada de grande variabilidade composicional no que se refere às águas que nela emergem, sendo estas geralmente classificadas como águas frias, águas frias gasocarbónicas, águas termais de menor temperatura (mesotermiais) ou maior temperatura (hipertermiais) e fumarolas.

Neste enquadramento, a nascente das Quenturas representa uma água termal de pH ácido, cuja temperatura de emergência é próxima de 59°C, apresentando-se muito mineralizada. É descrita como o resultado da contaminação de aquíferos pouco profundos por vapor hidrotermal que ascende do aquífero termal mais profundo.

Palavras-chave: Vulcão das Furnas, variabilidade composicional, concessão hidromineral, Recurso Hidromineral das Quenturas.

ABSTRACT

São Miguel Island, and specially the Furnas region, has been the focus of many studies since the 16th century, due to its thermal springs and the way the population interacts with them, mainly for therapeutic reasons and leisure. The occurrence of mineral and thermal springs in the Furnas Volcano is the result of volcanic phenomena, due to the origin of the island, and the presence of deep-seated and superficial hydrothermal systems, as well as the interaction of both. The compositional variability of the Furnas Volcano springs results in the occurrence of cold waters, cold carbonated waters, thermal waters and fumaroles, all within the Furnas caldera.

Given the importance of these water resources, a hydrothermal concession “Concessão Mineromedicinal Estância Termal das Furnas” was created in 1964, to legally regulate the exploitation of the mineral and thermal waters with specific chemical characteristics used for medical purposes. The “Estância Termal das Furnas Mineromedicinal Concession” regulated the exploitation of thirty three mineral and thermal waters within an area of 50 hectares. The “Quenturas” or “Água Férrea das Quenturas” thermal spring is one of the thirty three springs mentioned, and nowadays is being used as a thermal resource in the Furnas Boutique Hotel - Thermal & Spa, located near this spring.

The main purpose of this study is to promote a better scientific knowledge of the Quenturas thermal water, both in a quantitative and a qualitative matter, providing a contribution to its safe and correct management. To achieve this goal, the “Estância Termal das Furnas Mineromedicinal Concession” was updated, which included an inventory of the springs located within de concession area nowadays. These springs were sampled and geochemical and isotopic analyses were performed. By studying the characteristics of the springs located near the Quenturas thermal water, it is possible to better understand the behavior of the thermal aquifer associated with Quenturas.

The Furnas Volcano is known for its many different springs, showing a wide compositional variability. The waters from these springs are usually classified as cold waters, cold carbonated waters, thermal waters, hiperthermal waters and fumaroles.

In this context, Quenturas is a thermal spring that emerges with a temperature of 59°C, and an acidic pH, as well as high mineralization. Its origin is defined as the result of the contamination of superficial aquifers by steam provided from deep-seated thermal aquifers.

Keywords: Furnas Volcano, compositional variability, Estância Termal das Furnas Mineromedicinal Concession, Quenturas thermal spring.

Índice

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento Geral do Problema	1
1.2. Objetivos	1
2. Enquadramento Geral dos Açores	2
2.1. Localização Geográfica.....	2
2.2. Enquadramento Geoestrutural.....	2
2.3. Vulcanismo e Sismicidade Histórica	3
3. A Ilha de São Miguel e a Região das Furnas.....	4
3.1. Geomorfologia	4
3.2. Geologia e Tectónica.....	5
3.3. Clima e Solos	11
3.4. Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos.....	12
4. A Concessão Hidromineral da “Estância Termal das Furnas”	18
5. Metodologia.....	29
5.1. Amostragem	29
5.2. Determinações Analíticas em Campo	31
5.3. Determinações Analíticas em Laboratório.....	31
5.4. Tratamento de Dados	32
6. Caracterização Hidrogeoquímica da Área de Concessão e sua Envolvente.....	33
6.1. Introdução	33
6.2. Composição Físico-Química das Águas Amostradas	33
6.2.1. Parâmetros Físico-Químicos	33
6.2.2. Elementos Maiores – Cátions.....	37
6.2.3. Elementos Maiores – Ânions.....	39
6.2.4. Sílica (SiO ₂)	41
6.2.5. Sulfureto de Hidrogénio (H ₂ S).....	42
6.2.6. Elementos Menores e em Traço.....	43
6.2.7. Fácies Hidrogeoquímica.....	44
6.3. Análise Multivariada.....	45
6.3.1. Análise de Modo-R	45
6.3.2. Análise de Modo-Q.....	48
6.5. Análise Integrada dos Resultados	52
7. Caracterização Isotópica da Área de Concessão e sua Envolvente	57
7.1. Isótopos Ambientais Estáveis de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$	57
7.2. Isótopo Ambiental Radioativo de Trítio (^3H).....	65

8. Recurso Hidromineral das Quenturas.....	67
8.1. Caracterização	67
8.2. Modelo Conceptual	69
9. Conclusões.....	72
10. Referências Bibliográficas.....	76
11. Anexos.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1 – Listagem dos pontos inventariados, com indicação das determinações analíticas efetuadas.....	29
Quadro 6.1 - Matriz de componente rotativa que indica a contribuição de cada variável para determinado fator.	46
Quadro 7.1 – Resultados da determinação de ^3H e respectivos parâmetros associados às nascentes amostradas.....	66
Quadro 11.1 - Listagem das fumarolas e nascentes mencionadas nos documentos da concessão de 1964.....	81
Quadro 11.2 - Listagem final de nascentes e fumarolas inventariadas na “Hidrópole das Furnas” tendo como ponto de partida os documentos da “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas”, de 1964.	100
Quadro 11.3 - Listagem dos pontos amostrados/inventariados.....	104
Quadro 11.4 - Listagem de parâmetros de interesse analisados no INOVA e respectivos métodos analíticos e limites de quantificação.....	106
Quadro 11.5 - Resultados das determinações analíticas de campo, de SiO_2 e H_2S	109
Quadro 11.6 - Resultados das determinações analíticas de elementos maiores: aniões e catiões.....	111
Quadro 11.7 - Resultados das determinações analíticas de elementos menores e em traço.	113
Quadro 11.8 – Valores estatísticos obtidos para parâmetros físico-químicos e de campo.	116
Quadro 11.9 - Valores estatísticos obtidos para componentes principais.....	116
Quadro 11.10 - Valores estatísticos obtidos para componentes vestigiais.....	117
Quadro 11.11 – Matriz de correlação entre parâmetros físico-químicos e espécies dissolvidas na água.	118
Quadro 11.12 – Matriz de correlação entre espécies dissolvidas.....	118
Quadro 11.13 – Indicação de sobressaturação (+), subsaturação (-) ou equilíbrio (o) das águas amostradas no Vulcão das Furnas face às espécies minerais consideradas.....	125
Quadro 11.14 – Indicação de sobressaturação (+), subsaturação (-) ou equilíbrio (o) das águas amostradas no Vulcão das Furnas face às espécies minerais consideradas.....	127
Quadro 11.15 - Classificação das águas amostradas no Vulcão das Furnas de acordo com a sua tipologia.....	134
Quadro 11.16 - Composição isotópica das águas analisadas, com indicação dos valores dos principais parâmetros de campo.....	137
Quadro 11.17 - Dados relativos às amostras de água de precipitação.	139

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Enquadramento da Junção Tripla dos Açores e principais acidentes tectónicos associados. CMA - Crista Médio-Atlântica; RT- Rife da Terceira; ZFNA - Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFEA - Zona de Fratura Este dos Açores; ZFOA - Zona de Fratura Oeste dos Açores; ZFBPA - Zona de Fratura Banco Princesa Alice; ZFBA - Zona de Fratura Banco Açor; FG – Falha Glória; ZFFP - Zona de Fratura Faial-Pico; TSJ - Transformante de São Jorge	2
Figura 2.2 – Localização das principais manifestações de vulcanismo secundário na Ilha de São Miguel. O quadrado indica o polo fumarólico das Furnas (adaptado de IVAR/CIVISA).	4
Figura 3.1 – Traçado geral das caldeiras de subsidência presentes no Vulcão das Furnas (modificado de GUEST <i>et al.</i> , 1999).	5
Figura 3.2 – Complexos Vulcânicos da Ilha de São Miguel (NUNES, 2004).	6
Figura 3.3 – Principais estruturas vulcânicas do Vulcão das Furnas e envolvente (adaptado de GUEST <i>et al.</i> , 2015).	7
Figura 3.4 – Extrato da carta geológica da Ilha de São Miguel à escala 1:50000 (MOORE, 1991b).	7
Figura 3.5 – Perfil geológico interpretativo geral (Perfil 1) de um troço da margem Este da Lagoa das Furnas (NUNES, 2015). Pp-depósitos pomíticos <i>s.l.</i> , incluindo ignimbritos não soldados e <i>lahars</i> ; es-escórias; br-brechas vulcânicas/ignimbritos soldados; β -basalto <i>s.s.</i> ; T β -traqui-basalto; TA-traqui-andesito; T-traquito <i>s.s.</i> ; nasc.-nascente; LF-Lagoa das Furnas.	8
Figura 3.6 – Principais estruturas tectónicas identificadas na Ilha de São Miguel. O quadrado indica o Vulcão das Furnas (Adaptado de CARMO, 2013 e CARMO <i>et al.</i> , 2015).	9
Figura 3.7 – Principais estruturas e alinhamentos tectónicos do Vulcão das Furnas (Adaptado de GUEST <i>et al.</i> , 1994 e CARMO, 2013).	10
Figura 3.8 – Principais acidentes tectónicos e alinhamentos vulcânicos identificados na zona em estudo e localização das nascentes mapeadas na mesma zona. Indica-se, ainda, o local de amostragem de águas de precipitação para análises isotópicas (e.g..3 – LM) (Base: ortofotomapa de SRCTE/DSC; dados de tectónica cf. CARMO, 2013 e CARMO, <i>et al.</i> , 2015).	11
Figura 3.9 – Temperatura média anual (°C) da Ilha de São Miguel (SRAA/DRA, 2015).	11
Figura 3.10 - Distribuição espacial da precipitação anual acumulada na Ilha de São Miguel (SRAA/DRA, 2015).	12
Figura 3.11 – Hidrografia da ilha de São Miguel (adaptado de SRAM, 2012).	13
Figura 3.12 – Delimitação da bacia hidrográfica da Lagoa das Furnas (a, a branco <i>in</i> PROFICO, 2013) e da Bacia Hidrográfica da Ribeira dos Tambores (b, a laranja <i>in</i> SRAA/DRA, 2015).	13
Figura 3.13 – Delimitação das Massas de Água subterrâneas definidas para a ilha de São Miguel (base: SRAA/DRA, 2015).	14
Figura 3.14 – Massa de Água Furnas-Povoação (5, a rosa), limitada a Oeste pela Massa da Achada (4, a roxo) e a N, NE e E pela Massa de Água Nordeste-Faial da Terra (6, a verde). Na figura está indicada a rede hidrográfica a azul, bem como a batimetria da Lagoa das Furnas e as nascentes que constam desta massa de água (pontos azuis). (Base: SRAA/DRA, 2015). ¹	15
Figura 3.15 - Mapa de zonas preferenciais de recarga da ilha de São Miguel (adaptado de SRAM, 2012).	16

Figura 3.16 – Modelo conceptual da ocorrência de nascentes minerais e termais no arquipélago dos Açores (adaptado de CRUZ & FRANÇA, 2006).	16
Figura 3.17 – Modelo conceptual da transferência de massa que ocorre nas camadas mais superficiais do Vulcão das Furnas (adaptado de CRUZ <i>et al.</i> , 1999).	17
Figura 4.1 – Limite da zona de Concessão (retângulo), Zonas de Proteção A e B e localização das nascentes Fonte da Camarça (22) e Água da Helena (23) (Fonte: DRAIC).	19
Figura 4.2 – Localização das nascentes Água Férrea ou BCP I (ou Banhos Férreos; ref. 20), Água Férrea ou BCP II e Água Férrea ou BCP III.	20
Figura 4.3 – Localização das nascentes Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação (BCP) IV e Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação (BCP) V, com indicação de outras emergências presentes no mesmo local.	21
Figura 4.4 – Localização das nascentes Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação ou Banhos Férreos I (20), Dr. José Bruno (21) e Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação II, III, IV e V.	21
Figura 4.5 – Nascentes localizadas atualmente na Zona de Proteção A, distribuídas pelo Jardim das Termas (área 1), pela Chã das Caldeiras (área 2), ou entre as duas áreas (cf. 17).	22
Figura 4.6 – Nascentes (circunferências) localizadas atualmente na zona do Jardim das Termas.	23
Figura 4.7 - As nascentes (círculos claros) da concessão de 1964, com a respetiva referência.	24
Figura 4.8 - As fumarolas (círculos escuros) da concessão de 1964, com a respetiva referência.	24
Figura 4.9 – Registo fotográfico dos Banhos Cabaços presente em ACCIAIUOLI & NARCISO (1940; Vista de Sul para Norte).	26
Figura 4.10 – Registo fotográfico das nascentes RNS II e III (T=42°C) e nascente RNS IV (T=41,4°C).	27
Figura 4.11 – Localização das nascentes do Cabaço (24), Cabaço II, Ribeira de Nossa Senhora (25), Poça da Dona Beija, Sanguinhal (26) e das nascentes da Ribeira da Nossa Senhora II, III e IV (Base: ortofotomapa SRCTE).	27
Figura 4.12 – Localização das diversas nascentes e fumarolas integradas na área da “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas” e zona envolvente (Base: ortofotomapa SRCTE).	28
Figura 6.1 – Relação entre o pH e a temperatura (°C) das águas amostradas.	34
Figura 6.2 – Relação entre a temperatura (°C) e a CE (µS/cm) das águas amostradas.	34
Figura 6.3 – Relação entre o CO ₂ livre (mg/L) e a temperatura (°C) das águas amostradas.	35
Figura 6.4 – Distribuição do fluxo de CO ₂ no solo do Vulcão das Furnas (VIVEIROS <i>et al.</i> , 2010) com implementação dos valores de CO ₂ total obtidos para as águas amostradas (quadrados junto às zonas A, B, C e D).	36
Figura 6.5 – Evolução do sódio relativamente à CE das amostras analisadas.	37
Figura 6.6 – Relação entre os principais cátions presentes nas águas analisadas.	38
Figura 6.7 – Relação entre os principais cátions presentes nas águas analisadas.	38
Figura 6.8 – Evolução do bicarbonato relativamente à temperatura das águas analisadas.	39
Figura 6.9 – Evolução do cloreto relativamente à temperatura das águas analisadas.	40

Figura 6.10 – Relação entre a concentração em sílica e a temperatura das águas amostradas.....	41
Figura 6.11 – Relação entre SiO ₂ e HCO ₃ para as águas amostradas.	42
Figura 6.12 – Diagrama de DUROV com projeção das 42 águas analisadas (elaborado no QUALIGRAF).	45
Figura 6.13 – Valores do fator 1 por ponto de amostragem.	47
Figura 6.14 - Valores do fator 2 por ponto de amostragem.....	47
Figura 6.15 - Valores do fator 3 por ponto de amostragem.....	48
Figura 6.16 – Dendrograma obtido para 38 águas amostradas (<i>SPSS Statistics</i>).	49
Figura 6.17 – Gráfico da relação entre o pH e a temperatura (°C) das águas amostradas. A linha horizontal demarca as águas frias das termais (T =22°C) e a linha horizontal demarca as águas ácidas das básicas (pH=7).	53
Figura 6.18 – Distribuição espacial das diversas nascentes e fumarolas inventariadas no âmbito deste trabalho de projeto, de acordo com a sua tipologia (Base: ortofotomapa da SRCTE/DSC).	55
Figura 6.19 – Pormenor da distribuição espacial das nascentes e fumarolas inventariadas no âmbito deste trabalho de projeto, de acordo com a sua tipologia (Base: ortofotomapa da SRCTE/DSC).	56
Figura 7.1 – Principais processos envolvidos nos desvios de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ relativamente à RMAM (<i>global MWL</i>) (<i>in</i> CARVALHO, 1999).	58
Figura 7.2 - Relação entre a temperatura e o conteúdo em $\delta^{18}\text{O}$ das águas amostradas.....	59
Figura 7.3 - Relação Condutividade Elétrica (CE) vs $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas	60
Figura 7.4 - Relação pH vs $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.....	60
Figura 7.5 - Valores de oxigénio em função da altitude para cada tipologia de água.	61
Figura 7.6 - Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs altitude.	62
Figura 7.7 - Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ para as águas amostradas e valores de precipitação.	62
Figura 7.8 – Projeção das razões isotópicas obtidas para o fluido original/aquífero profundo e vapor relativamente às restantes águas amostradas. CG – Caldeira Grande; CA – Caldeira do Asmodeu; GP – Gloria Patri.	64
Figura 8.1 – Localização da nascente das Quenturas e das nascentes das Três Bicas e do Rego.	67
Figura 8.2 – Localização do (provável) arco de cratera localizado a NNO da Nascente das Quenturas (círculo preto). A azul é visível o traçado da Ribeira Quente, que parece contornar esta estrutura morfológica (<i>in</i> GEO.AZ, 2016).	68
Figura 8.3 – Modelo conceptual da origem da nascente das Quenturas, bem como de outras tipologias de águas presentes na Caldeira do Vulcão das Furnas, com base em perfil geológico interpretativo de um troço da Caldeira do Vulcão das Furnas (O-E/SO-NE).....	70
Figura 11.1 - Aspeto atual da nascente Dr. José Bruno (21) ou Água Peideira e respetiva placa de identificação.	82
Figura 11.2 – Nascente Grutinha I ou Ernesto Correia (5).....	83
Figura 11.3 – Nascente do Torno (7).	83

Figura 11.4 – Nascente da Grutinha II (6). As setas indicam as três bicas distintas.	83
Figura 11.5 – Nascente do Poço (9) ou “Poço da Tia Silvina” ou Pocinha.	83
Figura 11.6 - Aspeto atual da Nascente da Morangueira (8).	84
Figura 11.7 - Aspeto atual da captação da nascente das Quenturas (3) ou Água Férrea das Quenturas, conforme indica a placa junto à seta.	85
Figura 11.8 - A seta de maiores dimensões indica a nascente do Rego (1), canalizada após as obras de embelezamento e as setas de menores dimensões indicam o talude onde ocorrem outras emergências desta nascente.	85
Figura 11.9 - Exemplo de uma escorrência ocasional no talude das nascentes do Rego.	85
Figura 11.10 - Nascente Rego II, localizada nas escadas de acesso à nascente das Quenturas.	85
Figura 11.11 - Nascentes das Três Bicas (ou da Água das Quenturas), com indicação da Bica Direita (2), Bica Centro (2') e Bica Esquerda.	86
Figura 11.12 - Localizações de alguns pontos de escorrência (seta branca) no talude das Quenturas.	87
Figura 11.13 – Nascente da Água Azeda do Rebentão (13).	88
Figura 11.14 – Nascente da Bica da Água Santa (15).	88
Figura 11.15 – Nascente da Água Azeda (16).	88
Figura 11.16 – Nascente de Pimentel e Castro ou Dr. Diniz (14).	88
Figura 11.17 - Nascentes Miguel Henriques (10), à esquerda e Água da Prata (11), à direita.	89
Figura 11.18 - Nascente do Chalet Frio (12), onde a seta indica o local da escorrência, pouco visível no registo fotográfico devido às condições do próprio local. O tracejado delimita um depósito de enxofre que ocorre na parede N da estrutura.	90
Figura 11.19 - Nascente do Chalet Frio-Banhos.	90
Figura 11.20 - Caldeira do Asmodeu (C3).	91
Figura 11.21 - Caldeira de Pero Botelho ou das Lamas (C4).	91
Figura 11.22 - Caldeira do Esguicho (C5).	91
Figura 11.23 – Aspeto atual da Caldeira Grande (C1), onde a seta branca indica a localização da fumarola e a seta branca “B” a localização da bica onde emerge a água quente.	92
Figura 11.24 - Caldeirão do Chalet (C7) e respetiva bica (seta branca “B”).	92
Figura 11.25 - Pormenor da localização da bica onde emerge a água quente do Caldeirão do Chalet.	92
Figura 11.26 - Distribuição geográfica das Caldeiras Secas (C2, C2' e C2''), Caldeira Pequena e Caldeiras Barrentas.	93
Figura 11.27 - Caldeira dos Vimes (C6), com presença de uma fumarola de menores dimensões a NNO da mesma. As setas indicam os locais por onde se dá a escorrência e posterior entrada de água fria na Caldeira dos Vimes.	94
Figura 11.28 - Localização da fumarola da Caldeira da Lagoa das Furnas relativamente à área da concessão. A Lagoa das Furnas encontra-se a SE da fumarola (Base: Ortofoto SRCTE).	95
Figura 11.29 - Registo fotográfico do Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas, com indicação (seta) da fumarola em questão.	95

Figura 11.30 - Localização das nascentes exteriores à área de Concessão (18, 19, 24, 25 e 26) que são referidas em alguns documentos de 1964 (cf. Quadro 11.1). (Base: Ortofoto SRCTE)	96
Figura 11.31 - Aspeto atual da zona onde se encontrava a Nascente do Cabaço (vista de Oeste para Este) ocupada por inhames e por um pequeno curso de água canalizado no sentido da ribeira (seta) que atravessa a zona balnear da Poça da Dona Beija.	96
Figura 11.32 - Vista do túnel (de Sul para Norte) sob a estrada regional, com predominância de exsurgências na parede esquerda do mesmo. Algumas exsurgências foram canalizadas com recurso a tubos por forma a favorecer a escorrência, estando as principais indicadas com setas.	97
Figura 11.33 - Pormenor da parede esquerda do túnel, onde é visível a natureza férrea das exsurgências.	97
Figura 11.34 - Pormenor da parede esquerda do túnel, onde algumas escorrências estão canalizadas com recurso a tubos, conforme indicado pelas setas.	97
Figura 11.35 - Localização das nascentes Gloria Patri (bicas públicas), Tio José de Sousa e Água do Rego ou Misturas (Base: Ortofoto SRCTE).	98
Figura 11.36 - Aspeto atual das bicas públicas da nascente Gloria Patri, situadas na freguesia das Furnas.	99
Figura 11.37 - Aspeto atual da nascente Água do Rego ou Misturas.	99
Figura 11.38 - Registo fotográfico recente (2017) da nascente Tio José de Sousa. O tubo indicado pela seta não existia à data das campanhas de amostragem.	99
Figura 11.39 - Dispositivo para colheita de águas de precipitação, devidamente etiquetado (Amostra 1 – SC: Salto do Cavalo).	107
Figura 11.40 - Exemplo de instalação do dispositivo de colheita de águas de precipitação (Amostra 4 – FBH).	107
Figura 11.41 – Relação entre a Condutividade Elétrica (CE) e o pH das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	120
Figura 11.42 - Relação entre a concentração do CO ₂ livre e o pH das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	120
Figura 11.43 – Relação entre a Condutividade Elétrica e a concentração em CO ₂ livre das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	120
Figura 11.44 – Relação entre a Condutividade Elétrica (CE) e a Alcalinidade Total das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	120
Figura 11.45 - Distribuição dos valores de CO ₂ total calculados para as nascentes e fumarolas da Caldeira das Furnas (Base: Ortofoto SRCTE).	121
Figura 11.46 - Pormenor das zonas da Chã das Caldeiras, Jardim das Termas e Banhos Férreos (Base: Ortofoto SRCTE).	121
Figura 11.47 - Relação entre a temperatura das águas e a concentração em ião sódio nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	122
Figura 11.48 – Relação entre as concentrações dos iões cálcio e magnésio nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	122

Figura 11.49 – Relação entre magnésio e sódio dissolvidos nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	122
Figura 11.50 – Relação entre a concentração de ferro e magnésio nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	122
Figura 11.51 – Relação entre a Condutividade Elétrica (CE) e o cloreto nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	123
Figura 11.52 – Relação entre a temperatura e a concentração de sulfato nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	123
Figura 11.53 – Relação entre a sílica dissolvida e o pH das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	123
Figura 11.54 - Relação entre a sílica dissolvida e o CO ₂ total nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	123
Figura 11.55 – Valores de Log IS por ponto de amostragem para calcedónia.	128
Figura 11.56 – Valores de Log IS por ponto de amostragem para cristobalite.	128
Figura 11.57 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para o quartzo.	128
Figura 11.58 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para silicagel.	128
Figura 11.59 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para sílica amorfa (SiO _{2(a)}).	128
Figura 11.60 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para anortite.	129
Figura 11.61 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para albite.	129
Figura 11.62 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para microclina.	129
Figura 11.63 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para adulária.	129
Figura 11.64 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para clinoenstatite.	130
Figura 11.65 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para diópsido.	130
Figura 11.66 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para analcite.	130
Figura 11.67 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para fluorite.	130
Figura 11.68 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para forsterite.	130
Figura 11.69 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para montmorilonite-Ca.	131
Figura 11.70 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para caulinite.	131
Figura 11.71 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para ilite.	131
Figura 11.72 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para calcite.	132
Figura 11.73 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para dolomite.	132
Figura 11.74 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para siderite.	132
Figura 11.75 – Conteúdo em δ ¹⁸ O das águas amostradas no Vulcão das Furnas.	138
Figura 11.76 – Relação temperatura vs δ ¹⁸ O nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	138

Figura 11.77 - Gráfico da variação de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) com a altitude nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	138
Figura 11.78 - Gráfico de pormenor da variação de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) com a altitude nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	138
Figura 11.79 – Valores de $\delta^2\text{H}$ por ponto de amostragem.	140
Figura 11.80 – Relação temperatura vs $\delta^2\text{H}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	140
Figura 11.81 – Relação Condutividade Elétrica (CE) vs $\delta^2\text{H}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	140
Figura 11.82 – Relação pH vs $\delta^2\text{H}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.	140

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Geral do Problema

A ocorrência de nascentes de água mineral e termal é um fenómeno comum em regiões de origem vulcânica, de que são exemplo as ilhas do arquipélago dos Açores, nomeadamente a Ilha de São Miguel. Neste contexto específico, estas nascentes tendem a surgir associadas a eventos eruptivos, ou relacionados com a existência de sistemas hidrotermais mais superficiais ou profundos, que lhes conferem características específicas. No Vulcão das Furnas localiza-se um importante polo de nascentes, por vezes designado por “Hidrópole das Furnas” dada a variabilidade composicional das nascentes que lá emergem.

A “Concessão Mineromedicinal Estância Termal das Furnas” (adiante designada de “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas”), localizada na freguesia das Furnas, data de 1964 e conferia à antiga Junta Geral do Distrito Autónomo de Ponta Delgada “licença para explorar as nascentes de água mineromedicinal que constituem a Estância Termal das Furnas”, numa área total de 50 hectares. Esta área integra o atual Furnas Boutique Hotel – Thermal & Spa (antigo edifício do Centro Termal das Furnas/Banhos Novos) bem como o recurso hidromineral das Quenturas, atualmente captado e explorado para abastecimento da infraestrutura em apreço, com sistema de monitorização incorporado.

Tendo em conta a finalidade a que se destina a água captada da nascente das Quenturas (isto é, o abastecimento do edifício termal) o seu estudo revela-se uma mais-valia, pois melhora o conhecimento deste recurso hidromineral e contribui para uma mais correta gestão do mesmo.

1.2. Objetivos

O principal objetivo deste projeto de investigação é aprofundar o conhecimento científico, qualitativo e quantitativo, do recurso hidrotermal das Quenturas, como base de uma exploração sustentável.

Para tal, procedeu-se ao reconhecimento da zona de enquadramento onde se integra esta nascente, assente nos seguintes objetivos:

- a) Revisão e atualização da “Concessão Mineromedicinal Estância Termal das Furnas”, que licencia a exploração de diversas nascentes mineromedicinais, entre elas a nascente das Quenturas;
- b) Compilação de informação de carácter geológico, hidrogeológico, climatológico e institucional sobre o recurso em questão e zona envolvente;
- c) Caracterização qualitativa e quantitativa das nascentes integrantes da concessão, com base em dados de análises químicas elementares e isotópicas, com vista a melhor caracterizar o recurso hidromineral das Quenturas;
- d) Proposta de modelo conceptual do aquífero termal em que se insere recurso hidromineral das Quenturas com vista à correta gestão do mesmo.

A introdução dos diversos dados obtidos num SIG (Sistema de Informação Geográfica) de pormenor da zona das Furnas facilita a análise do comportamento do sistema aquífero termal associado à nascente em estudo, bem como a sua relação com os diversos fenómenos geológicos e vulcânicos que ocorrem no Vulcão das Furnas e que justificam a existência da designada “Hidrópole das Furnas”.

2. ENQUADRAMENTO GERAL DOS AÇORES

2.1. Localização Geográfica

O arquipélago dos Açores está localizado no Atlântico Norte, a aproximadamente 1600 km de Portugal Continental, distribuindo-se entre as latitudes 36°55' e 39°43'N e as longitudes 24°46' e 31°16'O. É constituído por um total de nove ilhas habitadas, divididas em três grupos: o Grupo Oriental, que engloba as ilhas de São Miguel e Santa Maria, o Grupo Central, com as Ilhas de São Jorge, Pico, Faial, Terceira e Graciosa e o grupo Ocidental, a que pertencem as ilhas das Flores e Corvo (Figura 2.1).

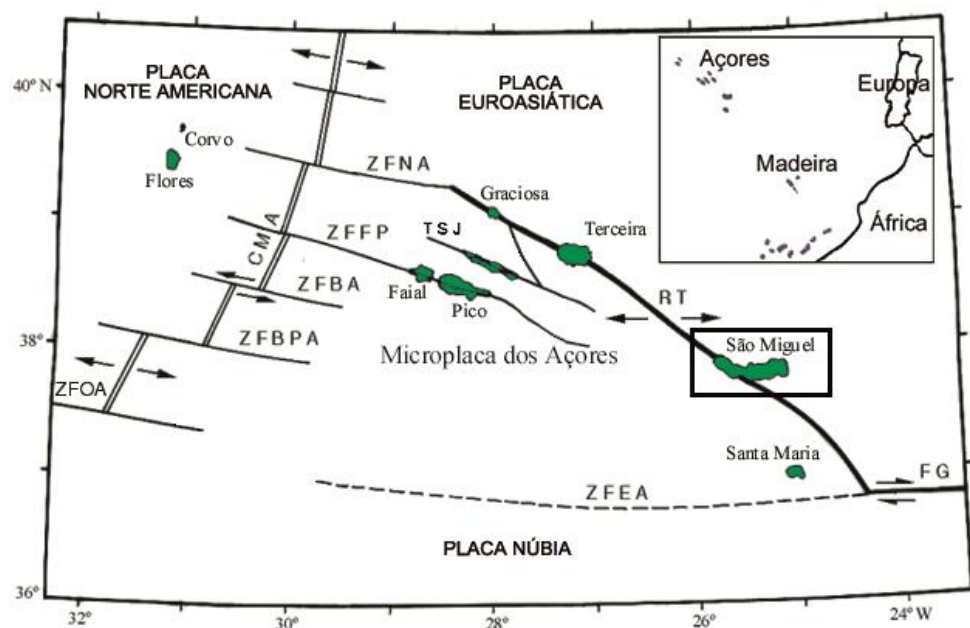


Figura 2.1 – Enquadramento da Junção Tripla dos Açores e principais acidentes tectónicos associados.
CMA - Crista Médio-Atlântica; RT- Rifte da Terceira; ZFNA - Zona de Fratura Norte dos Açores; ZFEA - Zona de Fratura Este dos Açores; ZFOA - Zona de Fratura Oeste dos Açores; ZFBPA - Zona de Fratura Banco Princesa Alice; ZFBA - Zona de Fratura Banco Açor; FG – Falha Glória; ZFFP - Zona de Fratura Faial-Pico; TSJ - Transformante de São Jorge
(adaptado de NUNES, 1999).

A ilha de São Miguel (assinalada na figura acima) é a mais setentrional do Grupo Oriental e localiza-se aproximadamente entre as latitudes 37°54'38'' e 37°42'38'' N e as longitudes 25°08'03'' e 25°51'17''O. É a maior ilha dos Açores, com 744,2 km², um comprimento máximo de cerca de 66 km e 16 km de largura máxima.

2.2. Enquadramento Geoestrutural

As ilhas dos Açores estão dispostas segundo uma direcção aproximada ONO-ESE (FRANÇA *et al.*, 2003) na designada Plataforma dos Açores, que se destaca dos fundos oceânicos e é delimitada pela curva batimétrica dos 2000 metros. As ilhas dos Açores estão implantadas na zona de interacção das placas Norte Americana, Euroasiática e Africana ou Núbica, formando a “Junção Tripla dos Açores” (Figura 2.1).

A este enquadramento estão associadas diversas estruturas tectónicas, nomeadamente a Crista Médio-Atlântica (CMA), o Rifte da Terceira (RT), a Zona de Fratura Norte dos Açores (ZFNA), a Zona de Fratura Este dos Açores (ZFEA) e a Zona de Fratura Oeste dos Açores (ZFOA), a Zona de Fratura Banco Princesa Alice (ZFBPA), a Zona de Fratura Banco Açor (ZFBA), a Falha Glória (FG),

a Zona de Fratura Faial-Pico (ZFFP) e a Transformante de São Jorge (TSJ) (FRANÇA *et al.*, 2003; Figura 2.1).

A CMA é uma estrutura distensiva pura, sismicamente ativa, que se prolonga de norte a sul do Oceano Atlântico, sendo intersectada por diversas falhas transformantes, em geral de direção E-O, que a fragmentam em diversos troços menores. Marca o limite entre a placa Norte Americana, que se encontra para Oeste desta estrutura, e as placas Euroasiática e Núbia, que se desenvolvem para E da mesma (*in* FRANÇA *et al.*, 2003). Atravessa o arquipélago entre as ilhas das Flores e Faial, estando a primeira, conjuntamente com o Corvo, localizadas na placa Norte Americana, e as restantes ilhas dispersas para leste desta estrutura.

A ZFNA está localizada a NO da ilha Graciosa e num dos troços onde a CMA se desloca cerca de 15 km para leste (*in* FRANÇA *et al.*, 2003). A ZFEA, atualmente inativa, prolonga-se até à Falha Glória (FG), troço da Fratura Açores-Gilbraltar que marca o limite entre as placas Euroasiática e Núbia na região a leste do arquipélago. O prolongamento da ZFEA para Oeste parece corresponder à ZFOA, apesar de esta se localizar ligeiramente mais a Norte (*in* FRANÇA *et al.*, 2003).

O Rifte da Terceira, descrito por MACHADO (1959), é uma estrutura de direção aproximada ONO-ESE, que se estende desde a CMA, passando pelas ilhas Graciosa, Terceira e zona Oeste de São Miguel, até Este da ilha de Santa Maria, onde conflui com a FG. É a mais importante estrutura tectónica do arquipélago, cuja orientação geral é similar à de outras estruturas da “Junção Tripla dos Açores”, como é o caso da TSJ e da ZFFP (GUEST *et al.*, 1999).

Apesar de o limite entre a placa Norte-Americana e as restantes estar bem definido, o limite entre as placas Euroasiática e Núbia para Oeste da Falha da Glória é ainda motivo de discórdia, com alguns autores a considerar que este limite é dado pelo Rifte da Terceira, enquanto outros autores consideram que ocorre na Zona da Transformante de São Jorge ou na Zona de Fratura Faial-Pico (*in* FRANÇA *et al.*, 2003). Segundo FORJAZ (1983) a “Junção Tripla dos Açores” é marcada pela “microplaca dos Açores”, de forma triangular, delimitada pela CMA a oeste, pela ZFEA a sul e pelo RT a NE (*in* FRANÇA *et al.*, 2003; Figura 2.1).

2.3. Vulcanismo e Sismicidade Histórica

Devido ao seu peculiar enquadramento geodinâmico, os Açores têm registado importantes fenómenos de vulcanismo e de sismicidade, que têm ocorrido desde a descoberta e povoamento das diversas ilhas. Para o arquipélago estão documentadas 26 erupções vulcânicas, 12 das quais subaéreas e que se dispersam por diversas ilhas (entre elas São Miguel) e que apresentam carácter maioritariamente efusivo e natureza básica (FRANÇA *et al.*, 2003). A ilha de São Miguel regista a ocorrência de erupções de carácter explosivo e ácido, dos tipos subpliniano, pliniano e hidromagmático, duas das quais ocorreram na Caldeira do Vulcão das Furnas, em 1439-43 e 1630 (FRANÇA *et al.*, 2003).

No arquipélago surgem ainda manifestações secundárias de vulcanismo, em especial sob a forma de nascentes termais, gasocarbónicas, fumarolas e emissões gasosas difusas em solos, que ocorrem nas ilhas de São Miguel, Terceira, Graciosa, Faial, Pico e Flores (FRANÇA *et al.*, 2003). Os principais polos da Ilha de São Miguel ocorrem nas Furnas e na Ribeira Grande (Figura 2.2).

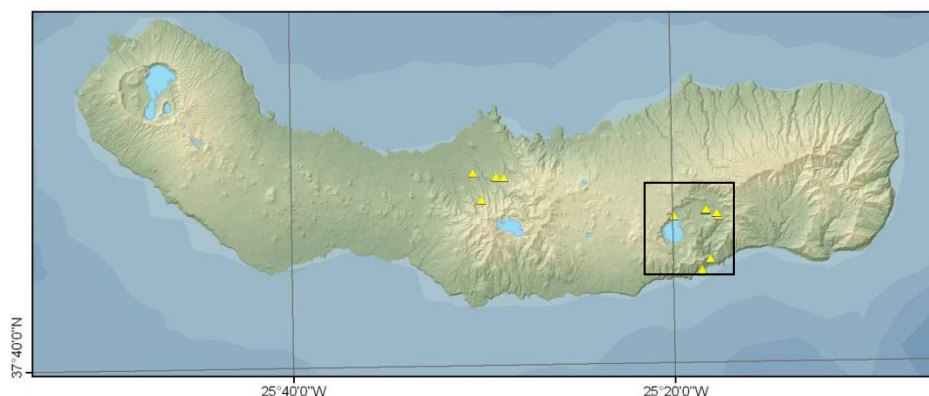


Figura 2.2 – Localização das principais manifestações de vulcanismo secundário na Ilha de São Miguel.

O quadrado indica o polo fumarólico das Furnas (adaptado de IVAR/CIVISA).

A magnitude dos fenómenos sísmicos que ocorrem nos Açores está relacionada quer com a sua tectónica ativa, quer com o seu vulcanismo histórico e atual, cuja ocorrência é geralmente precedida e acompanhada por sismos em número e magnitude variáveis. A atividade sísmica tende a manifestar-se no arquipélago sobretudo sob a forma de microssismos (sismos de magnitude inferior a 3) em elevado número (FRANÇA *et al.*, 2003), ocorrendo ocasionalmente sismos destrutivos de maior magnitude. A última crise sísmica ocorrida na Ilha de São Miguel data de 1988/89 e o sismo de maior intensidade data de Outubro de 1522 (FRANÇA *et al.*, 2003).

Os acidentes tectónicos que enquadram o arquipélago têm uma contribuição importante para a atividade sísmica dos Açores, nomeadamente o RT e a ZFFP, bem como a atividade sísmica na CMA que, dada a sua distância às ilhas, não costuma gerar eventos de intensidade superior a V nas mesmas (FRANÇA *et al.*, 2003).

3. A ILHA DE SÃO MIGUEL E A REGIÃO DAS FURNAS

3.1. Geomorfologia

A ilha de São Miguel alonga-se segundo uma direção geral E-O, apresentando importantes maciços montanhosos, como seja o caso do Maciço das Furnas, onde predominam vertentes com declives acentuados, nos quais os efeitos do escoamento de superfície são visíveis (SRAM, 2012). A ilha atinge uma cota máxima de 1103 metros (Pico da Vara) e cerca de 65% da sua superfície insular apresenta cotas inferiores a 400 metros, dando-se o desenvolvimento habitacional preferencialmente nas zonas de litoral, constituindo uma exceção a freguesia da Furnas, que se desenvolve no interior da caldeira que lhe dá o nome (SRAM, 2012).

São descritas oito unidades geomorfológicas distintas para a Ilha de São Miguel (ZBYSZEWSKI *et al.*, 1958; 1959): (1) Maciço Vulcânico das Sete Cidades, (2) Região dos Picos, (3) Maciço Vulcânico de Água de Pau, (4) Planalto da Achada das Furnas, (5) Vulcão das Furnas, (6) Vulcão da Povoação, (7) Região do Nordeste e (8) Serra da Tronqueira e (8) Planalto Litoral do Norte.

De forma sucinta, o Vulcão das Furnas está localizado a Este do Planalto da Achada das Furnas, a Oeste do Vulcão da Povoação e engloba o aparelho vulcânico poligenético com a mesma designação, encimado por um complexo de caldeiras com um diâmetro máximo de aproximadamente 8 km (FRANÇA *et al.*, 2003). O contraste entre as vertentes N e S deste vulcão é nítido, existindo declives menos abruptos a N, onde são visíveis ribeiras profundamente encaixadas. No interior da

Vulcão da Povoação, o Vulcão das Furnas, o Vulcão das Sete Cidades, o Vulcão do Fogo e o Complexo Vulcânico dos Picos (Figura 3.2).

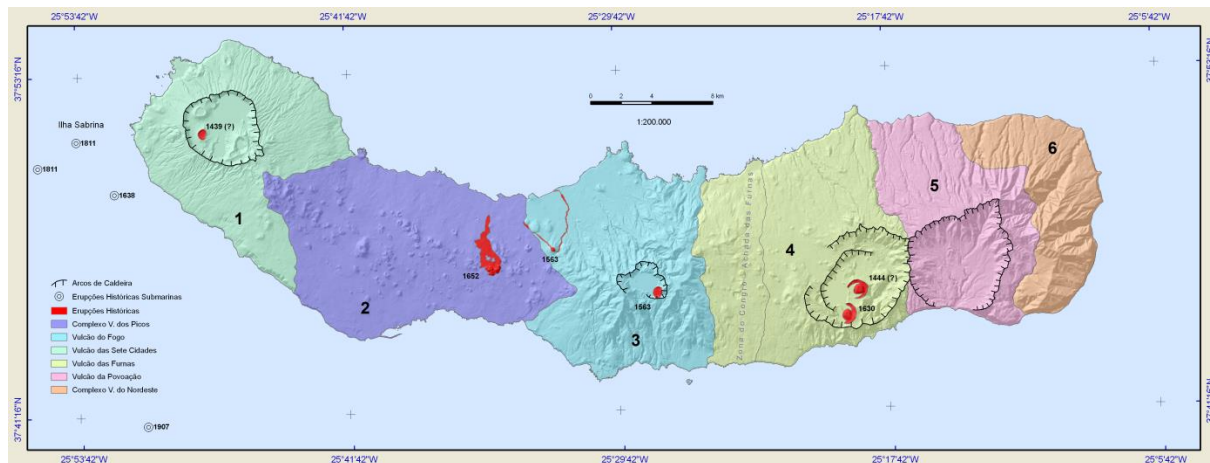


Figura 3.2 – Complexos Vulcânicos da Ilha de São Miguel (NUNES, 2004).

De Oeste para Este: (1) Vulcão das Sete Cidades; (2) Complexo Vulcânico dos Picos; (3) Vulcão do Fogo; (4) Vulcão das Furnas; (5) Vulcão da Povoação; (6) Complexo Vulcânico do Nordeste.

Alguns autores (CARMO *et al.*, 2015) consideram a Zona Fissural do Congro-Achada das Furnas, delimitada como parte integrante do Vulcão das Furnas na Figura 3.2, como um sistema fissural distinto, surgindo separado do Vulcão das Furnas e dando origem a uma sétima unidade vulcanoestratigráfica denominada por Sistema Vulcânico Fissural do Congro.

O Vulcão das Furnas, com os Vulcões do Fogo e Sete Cidades e a zona de vulcanismo basáltico do Complexo dos Picos, constituem os quatro sistemas vulcânicos ativos da ilha de São Miguel, sendo o Vulcão das Furnas a terminação leste deste vulcanismo mais recente (NUNES, 2004).

Segundo MOORE (1990), a edificação deste vulcão teve início há cerca de 100 mil anos, apresentando um longo historial eruptivo, predominando o vulcanismo de caráter ácido e silicioso. Estão identificados 92 centros eruptivos monogenéticos no vulcão poligenético das Furnas e zona fissural adjacente do Planalto da Achada (NUNES *et al.*, 2004), dos quais 23 se encontram localizados no interior da Caldeira das Furnas, na sua maioria domos traquíticos (p.e. Pico das Marconas) e anéis pomíticos (p.e. Lagoa Seca; Figuras 3.1 e 3.3). O edifício vulcânico do Vulcão das Furnas cobre cerca de 166 km², correspondendo a um volume subaéreo de cerca de 64 km³. O valor do diâmetro médio da base é de cerca de 14,1 km² e a cota máxima atingida é de 805 m (NUNES *et al.*, 2004).

Nos últimos 5000 anos ocorreram pelo menos 10 erupções explosivas siliciosas no Vulcão das Furnas (BOOTH *et al.*, 1978), das quais duas tiveram início com uma fase hidromagmática explosiva, a que se seguiu uma fase efusiva com a extrusão de domos traquíticos *s.l.* Trata-se das erupções históricas de 1439-1443 A.D, na zona da Lagoa Seca – Pico do Gaspar (QUEIROZ *et al.*, 1995) e de 1630 A.D., na zona da Chã do Chão-Cova da Burra (Figura 3.3). Nos flancos deste vulcão há 69 centros eruptivos, destacando-se 53 cones de escórias, de dimensões e formas variadas, que ocorrem na dependência de um vulcanismo marcadamente basáltico *s.l.*, que se dispõe principalmente ao longo dos flancos N e O (NUNES, 2013; Figura 3.3).

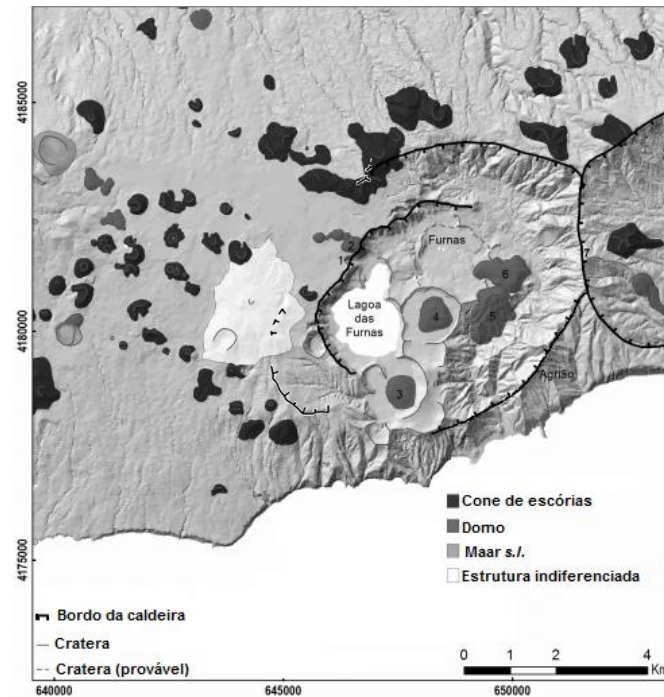


Figura 3.3– Principais estruturas vulcânicas do Vulcão das Furnas e envolvente (adaptado de GUEST *et al.*, 2015).

(1) Salto da Inglesa; (2) Pico do Ferro; (3) Domo 1630; (4) Pico do Gaspar c.1439-44;
(5) Pico das Marconas; (6) Pico das Caldeiras; (7) Pico do Canário.

As formações geológicas aflorantes, na sua maioria posteriores a uma escoada lávica datada de 48.000 ± 4.000 anos, consistem, maioritariamente, em depósitos piroclásticos de queda e de fluxo, com claro predomínio dos depósitos piroclásticos pomíticos (MOORE, 1990; 1991a). Aos depósitos pomíticos de queda, espessos e abundantes, juntam-se depósitos de ignimbritos e *lahars*, bem como domos e *coulées* de natureza traquítica *s.l.* (GUEST *et al.*, 1999; Figura 3.4).

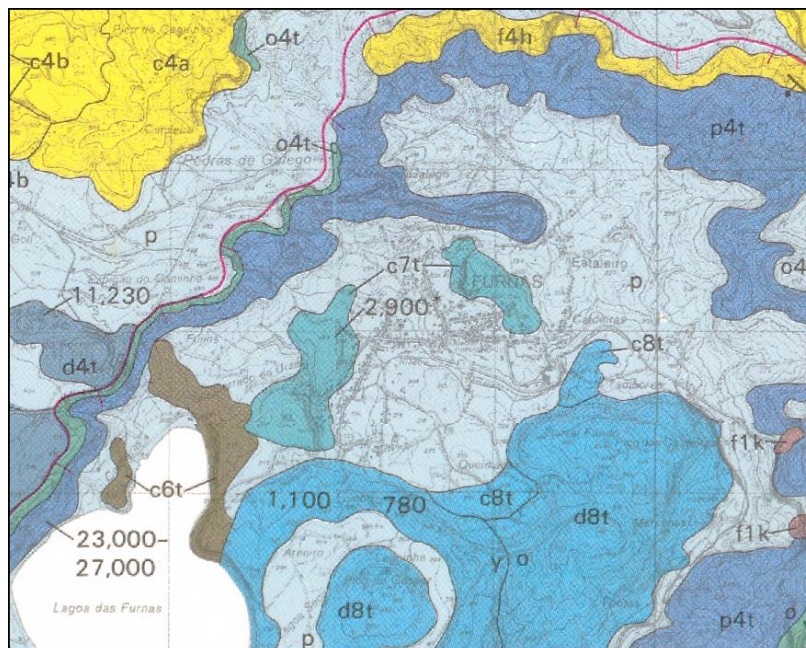


Figura 3.4 – Extrato da carta geológica da Ilha de São Miguel à escala 1:50000 (MOORE, 1991b).

“c”- cones e depósitos de escórias e/ou spatter basálticos *s.l.*; “c6t, c7t, c8t”- anéis pomíticos; “d”- domos traquíticos *s.l.*; “f”- escoadas lávicas basálticas *s.l.*; “o” - depósito pré-caldeira interior; “p”- depósitos pomíticos; “23,000”- idade em anos BP (before present);

As escoadas lávicas basálticas *s.l.* encontram-se em menor número e as espessas escoadas lávicas traquíticas *s.l.* (e.g. domos e *coulées* atrás referidos) constituem as mais importantes formações geológicas efusivas do Vulcão das Furnas, encontrando-se frequentemente capeadas por depósitos pomíticos de espessura variável entre alguns metros a dezenas de metros (Figura 3.4; NUNES, 2013).

A estratigrafia proposta para o Vulcão das Furnas (GUEST *et al.*, 1999; 2015) está dividida em três grupos distintos, denominados por Grupo Inferior, Grupo Intermédio e Grupo Superior. A formação mais antiga descrita (95.000 anos; GUEST *et al.*, 2015) corresponde a um nível de lavas basais anterior aos três grupos atrás referidos.

O Grupo Inferior é o mais antigo, estando limitado superiormente pelo “Ignimbrito da Povoação”, datado de há cerca de 30.000 anos. De uma forma geral, engloba alternâncias entre depósitos pomíticos de fluxo e de queda, como *surges*, ignimbritos, *debris-flow* e depósitos estratificados de *lapili* e cinzas pomíticas, bem como algumas lavas traquíticas (GUEST *et al.*, 2015).

O Grupo Intermédio caracteriza-se por apresentar uma alternância entre depósitos piroclásticos de queda e de fluxo, como *lapili* e cinzas pomíticas e escoriáceas, escoadas lávicas, ignimbritos e *surges*, bem como sedimentos lacustres. Este grupo forma o preenchimento da caldeira mais antiga, e está limitado superiormente pelo depósito denominado “Fogo A”, datado de há 5000 anos (GUEST *et al.*, 1999; 2015).

O Grupo Superior, o mais recente dos três, compreende materiais vulcânicos compostos essencialmente por alternâncias de cinzas e níveis de *lapili* pomítico, consequência das 10 erupções traquíticas que ocorreram nas Furnas nos últimos 5000 anos, conforme indicado por BOOTH *et al.*, (1978). A erupção mais recente que nele se enquadra é a de 1630 (Figura 3.3), estando as restantes erupções designadas por Furnas A, B, C, etc., até Furnas H, sendo a erupção Furnas C considerada a maior deste período (GUEST *et al.*, 1999; 2015).

Apesar dos trabalhos de ZBYSZEWSKI (1958, 1959), MOORE (1990) e GUEST (1999, 2015) não existe uma cartografia vulcanológica de detalhe (e.g. escala 1/10000) do Vulcão das Furnas, com exceção de alguns estudos setoriais específicos, como é o caso de NUNES, 2015 (Figura 3.5).

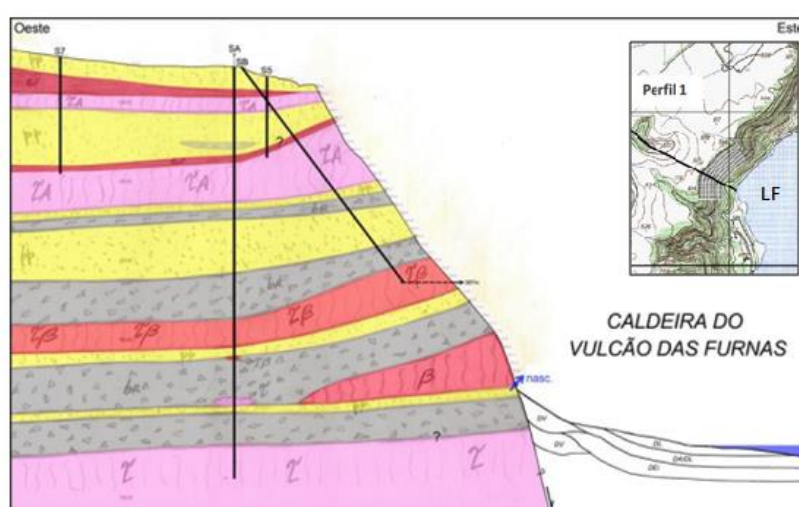


Figura 3.5 – Perfil geológico interpretativo geral (Perfil 1) de um troço da margem Este da Lagoa das Furnas (NUNES, 2015). Pp-depósitos pomíticos *s.l.*, incluindo ignimbritos não soldados e *lahars*; es-escórias; br-brechas vulcânicas/ignimbritos soldados; β-basalto *s.s.*; Tβ-traqui-basalto; TA-traqui-andesito; T-traquito *s.s.*; nasc.-nascente; LF-Lagoa das Furnas.

A nível petrográfico, o Vulcão das Furnas é aquele que apresenta rochas de composição mais potássica, quando comparado com os Vulcões das Sete Cidades ou Fogo (QUEIROZ, 1998 *in* GUEST *et al.*, 1999), variando a composição das rochas entre basaltos e traquitos, com passagem por diversos membros intermédios.

Tectónica

Embora os vulcões poligenéticos da Povoação, Furnas e Fogo definam um alinhamento geral E-O, coincidente com a forma alongada da metade oriental da ilha de São Miguel, as estruturas tectónicas dominantes na ilha apresentam direcções NO-SE e ONO-ESE. Estão igualmente identificadas estruturas NNO-SSE a N-S e NE-SO a E-O (Figura 3.6), embora estas sejam menos frequentes (CARMO *et al.*, 2015). Assim, os vulcões centrais surgem em zonas de intersecção de falhas principais e nas zonas fissurais os cones monogenéticos alinham-se principalmente segundo as direcções NO-SE a ONO-ESE (CARMO *et al.*, 2015; Figura 3.6).

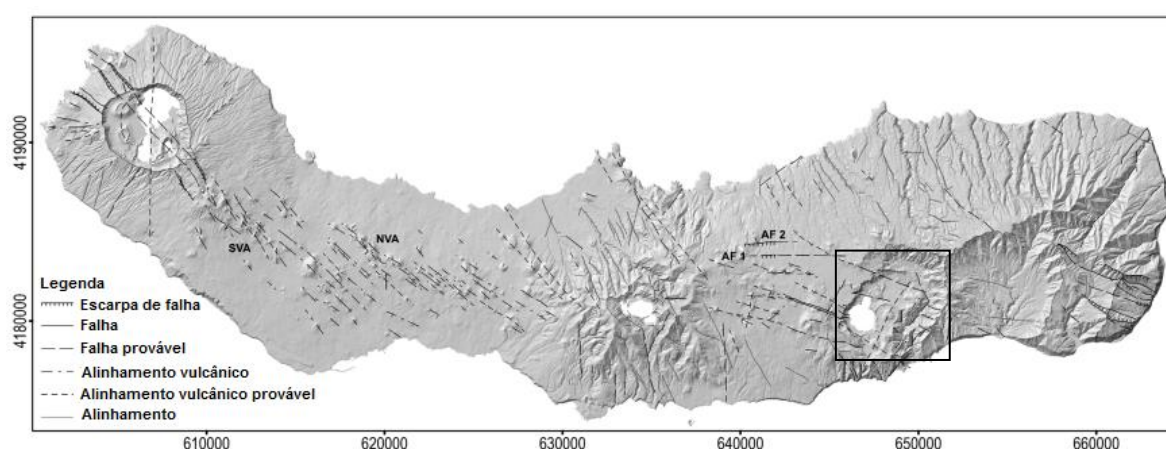


Figura 3.6 – Principais estruturas tectónicas identificadas na Ilha de São Miguel. O quadrado indica o Vulcão das Furnas (Adaptado de CARMO, 2013 e CARMO *et al.*, 2015).

No Vulcão das Furnas predominam acidentes tectónicos de direcção geral NE-SO, com predomínio também de acidentes de orientação N-S e NNO-SSE, estes últimos melhor expressos nas arribas Sul (NUNES, 2013, Figuras 3.6 e 3.7). Algumas estruturas dispõem-se segundo uma direcção E-O a ONO-ESE, manifestando algumas nítida componente normal, provavelmente associada a uma componente de desligamento direito (GUEST *et al.*, 1994; 1999).

O alongamento NE-SO apresentado pelas caldeiras interior e exterior do Vulcão das Furnas é indicador da importância deste padrão de fraturas, sendo sugerido (GASPAR *et al.*, 1995) que os episódios de colapso que acompanharam a formação destas caldeiras se devem à cedência de zonas estruturalmente mais fracas, as quais, por seu turno, condicionaram a implantação das formas vulcânicas monogenéticas (Figura 3.7).

Como referido, as falhas de direcção N-S são mais visíveis no bordo Sul do Vulcão das Furnas, sendo identificáveis pelas direcções de alinhamento dos vales fluviais, como é o caso do vale da Ribeira Quente (NUNES, 2013; Figura 3.7) e influenciam o padrão de drenagem da região.

O sistema de falhas ONO-ESE a E-O domina sobretudo nos bordos Oeste e Leste do Vulcão das Furnas e junto à margem N da Lagoa das Furnas. Os alinhamentos vulcânicos que se estendem

para a zona fissural adjacente do Congro – Achada das Furnas seguem este sistema de falhas (CARMO *et al.*, 2015; Figuras 3.6 e 3.7).

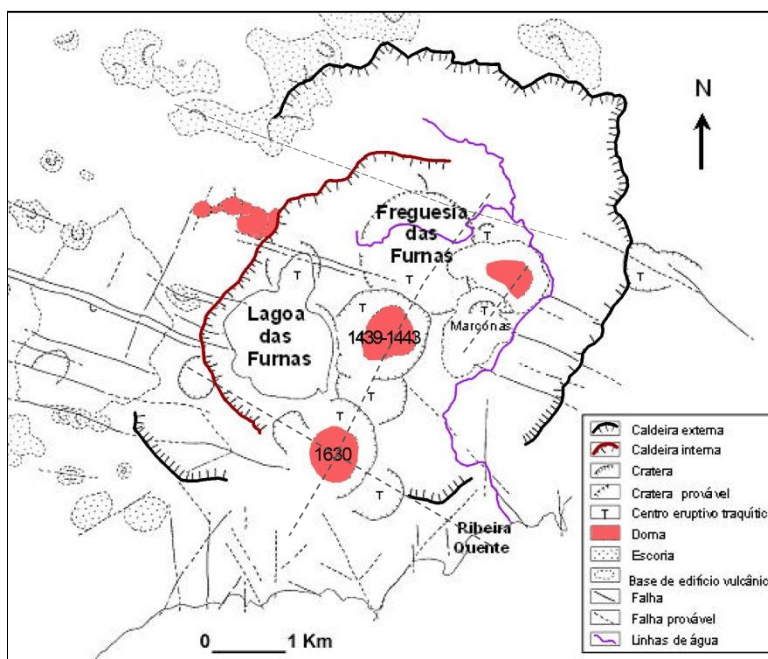


Figura 3.7 – Principais estruturas e alinhamentos tectónicos do Vulcão das Furnas
(Adaptado de GUEST *et al.*, 1994 e CARMO, 2013).

O sistema tectónico regional e local presente do Vulcão das Furnas manifesta-se, ainda, pelo aparecimento, à superfície, de fumarolas e nascentes termais e gasocarbónicas localizadas no interior da caldeira, as quais definem alinhamentos de direção geral ONO-ENE a NE-SO.

Na Figura 3.8 estão representados os principais alinhamentos tectónicos mencionados e deduzidos para a zona em estudo, bem como a localização de nascentes minerais e termais e fumarolas que ocorrem na caldeira do Vulcão das Furnas, e serão abordadas em capítulos posteriores. Os bordos da caldeira externa e interna (cf. Figura 3.7) estão delimitados a traço mais escuro, e os bordos das diversas crateras a traço mais fino. A figura 3.8 contém ainda a localização de pontos de amostragem de águas de precipitação, que serão mencionados em capítulos posteriores.

Salienta-se o facto de a maioria dos acidentes tectónicos cartografados nas Furnas serem inferidos, quer a partir de alinhamentos de centros eruptivos, em geral domos e cones, quer da localização de nascentes minerais e termais e focos fumarólicos (NUNES, 2013), pelo que a fotografia aérea tem um papel preponderante na identificação destas estruturas (CARMO *et al.*, 2015). Isto deve-se principalmente ao facto de o Vulcão das Furnas, representando um edifício poligenético ativo e com histórico de atividade explosiva e recente, apresentar uma cobertura geral de materiais pomíticos, que mascaram as fraturas e obliteram a sua eventual expressão morfológica (NUNES, 2013).

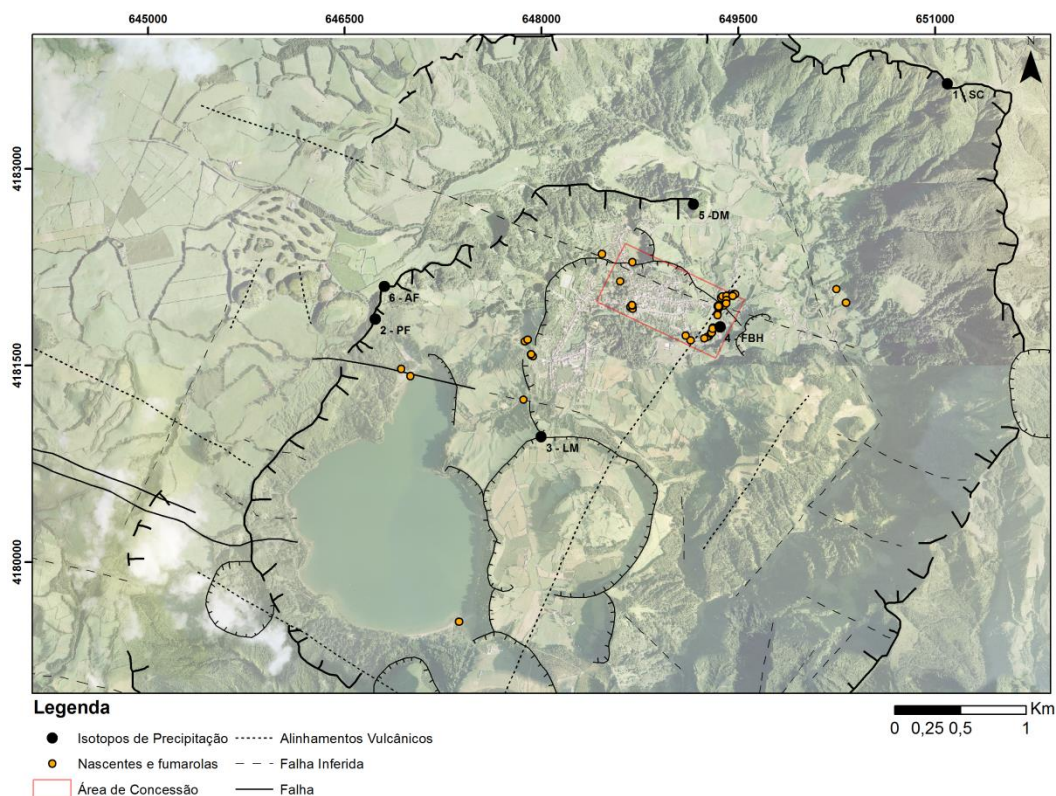


Figura 3.8– Principais acidentes tectónicos e alinhamentos vulcânicos identificados na zona em estudo e localização das nascentes mapeadas na mesma zona. Indica-se, ainda, o local de amostragem de águas de precipitação para análises isotópicas (e.g..3 – LM) (Base: ortofotomapa de SRCTE/DSC; dados de tectónica cf. CARMO, 2013 e CARMO, *et al.*, 2015).

3.3. Clima e Solos

O clima do arquipélago dos Açores é definido como temperado, apresentando características que permitem classificá-lo como mesotérmico húmido com características oceânicas (SRAA/DRA, 2015). A ilha de São Miguel apresenta temperatura média anual de 17°C (SRAM, 2012). No interior da caldeira do Vulcão das Furnas a temperatura média anual do ar é em geral superior a 12°C, apresentando um valor médio de cerca de 17,5°C (BRITO, 2013; Figura 3.9).

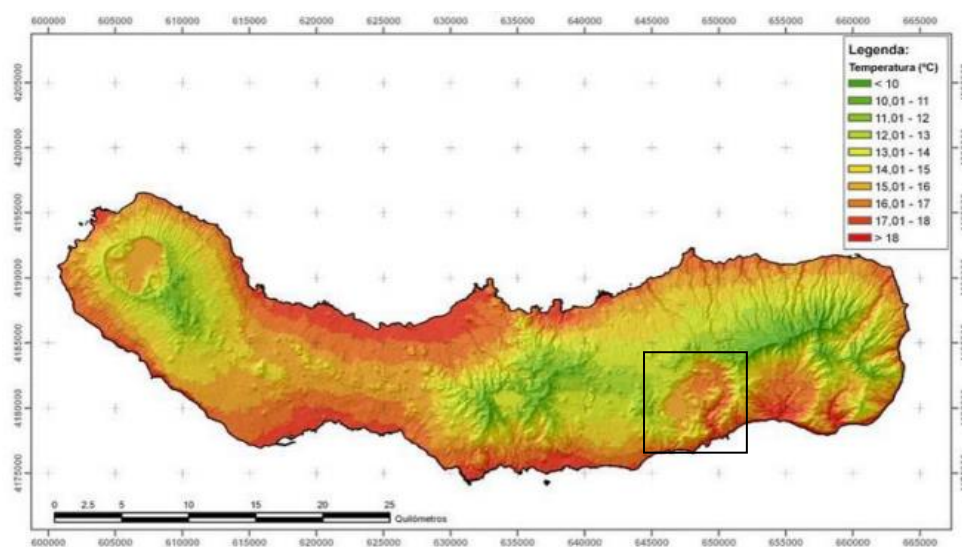


Figura 3.9– Temperatura média anual (°C) da Ilha de São Miguel (SRAA/DRA, 2015). O quadrado da figura indica a caldeira do Vulcão das Furnas.

A humidade relativa do ar é elevada, com média de cerca de 80% para a Ilha de São Miguel (SRAA/DRA, 2015), sendo que no Vulcão das Furnas baixa para valores de 74% na época do Verão (BRITO, 2013). O nevoeiro frequente e as baixas taxas de insolação (39% para a Ilha de São Miguel, segundo SRAA/DRA, 2015 e 27% para a zona da Lagoa das Furnas, segundo BRITO, 2013) contribuem para os valores da humidade relativa do ar, bem como a ocorrência de ventos vigorosos e precipitação regular e abundante (SRAM, 2012).

A distribuição da precipitação anual acumulada na Ilha de São Miguel (Figura 3.10) apresenta valores superiores a 3000 mm nas zonas mais altas, com algumas zonas do litoral a atingir valores inferiores a 1000 mm.

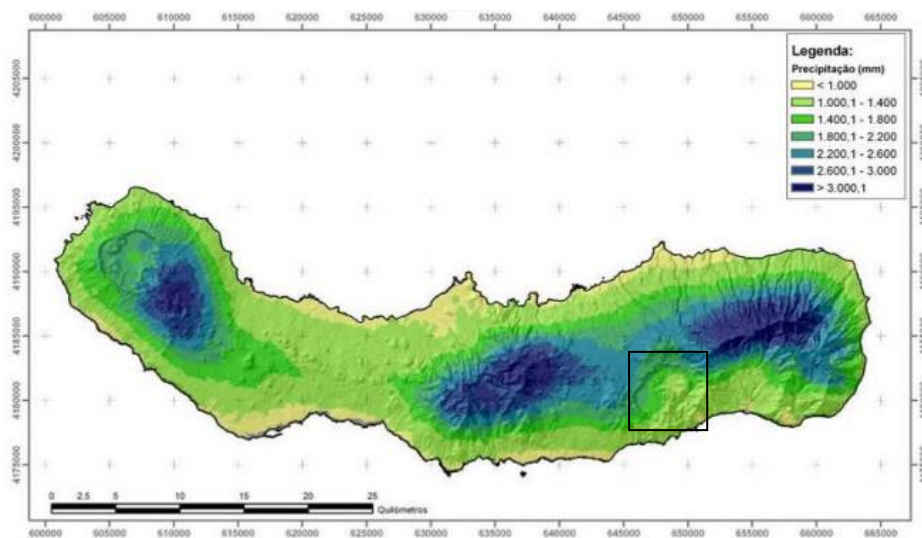


Figura 3.10 - Distribuição espacial da precipitação anual acumulada na Ilha de São Miguel (SRAA/DRA, 2015).
O quadrado da figura indica a caldeira do Vulcão das Furnas.

Na zona da freguesia das Furnas os valores de precipitação variam entre as classes 1000-1800 mm, verificando-se valores na zona da Lagoa das Furnas entre 1800 a 2200 mm (SRAA/DRA, 2015). Estes valores são consistentes com os apontados por BRITO (2013) de 1097 mm para a Ribeira Quente e 1864 mm para a Lagoa das Furnas. Para as cotas mais altas do Vulcão das Furnas são apontados valores de 2362 mm (CRUZ *et al.*, 1999).

O esboço pedológico da ilha de São Miguel identifica doze tipologias de solo. No Vulcão das Furnas predomina o andosolo insaturado normal (RICARDO *et al.*, 1977 *in* NUNES, 2013), que deriva de materiais piroclásticos e apresenta na sua fração argilosa materiais estruturalmente fracos, dando origem a características como baixa densidade aparente, porosidade elevada, dificuldade de dispersão ou elevada capacidade de retenção de água (FONTES, 1999 *in* SRAM, 2012). Neste contexto insular, a presença deste tipo de solos é resultado da natureza vulcânica do arquipélago e da constituição da sua fração argilosa, estando também dependente do clima, altitude, origem e idade do local onde se forma (SRAA/DRA, 2015).

3.4. Recursos Hídricos Superficiais e Subterrâneos

Recursos Hídricos Superficiais

A ilha de São Miguel é provida de uma importante rede de drenagem superficial, com exceção de uma área que corresponde, aproximadamente, à unidade geomorfológica da Região dos Picos

(Figura 3.11), dada a sua natureza vulcânica (e.g. escoadas lávicas e piroclastos basálticos) e idade mais recente.

O regime hidrológico no interior da caldeira do Vulcão das Furnas é o resultado direto da interação entre a topografia local e a tectónica (CRUZ *et al.*, 1999), estando nela instalada uma densa e complexa rede hidrográfica que converge para a Ribeira Quente. Esta linha de água permanente transporta os caudais de numerosos afluentes, incluindo a descarga proveniente da Lagoa das Furnas, quer de escoamento superficial, quer por transferência subterrânea, e apresenta uma superfície drenante de aproximadamente 40 km² (SRAA/DRA, 2015).

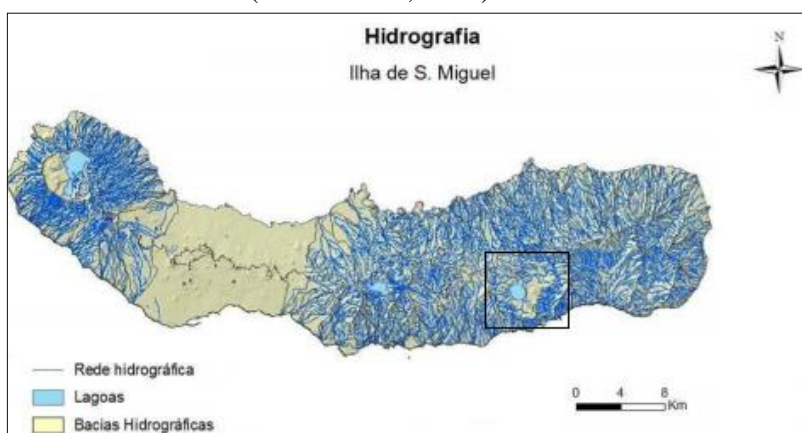


Figura 3.11 – Hidrografia da ilha de São Miguel (adaptado de SRAM, 2012).
O quadrado da figura indica a caldeira do Vulcão das Furnas.

A bacia hidrográfica da Caldeira do Vulcão das Furnas divide-se em duas sub-bacias principais, nomeadamente a Bacia da Lagoa das Furnas e a Bacia da Ribeira Quente (figura 3.12).

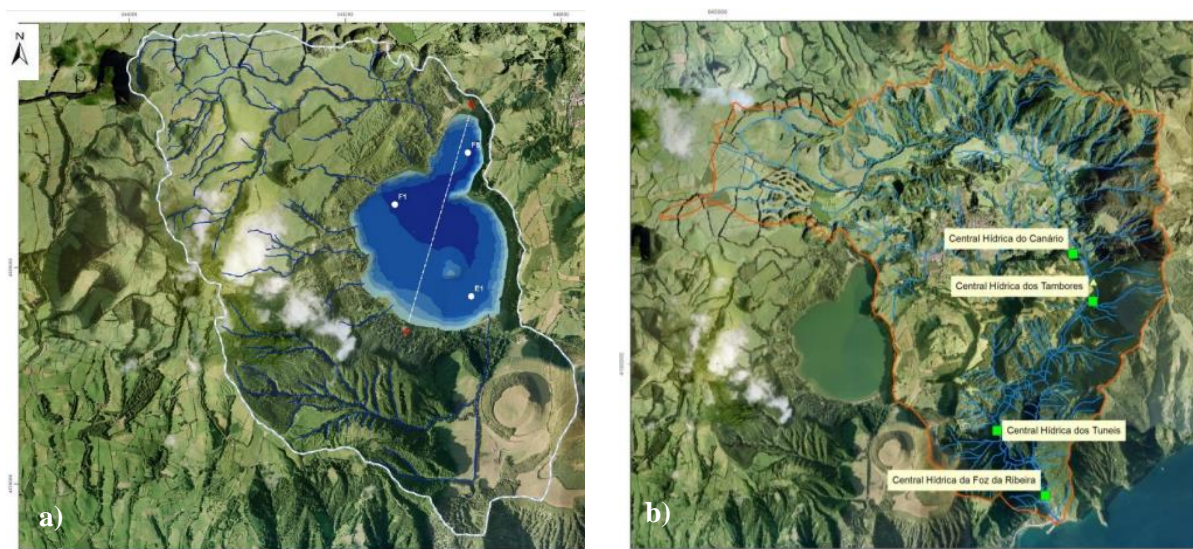


Figura 3.12 – Delimitação da bacia hidrográfica da Lagoa das Furnas (a, a branco in PROFICO, 2013) e da Bacia Hidrográfica da Ribeira Quente (b, a laranja in SRAA/DRA, 2015)

A Bacia da Lagoa das Furnas engloba uma área de recarga de 12,63 km², ocorrendo a recarga preferencialmente através dos bordos Oeste e SO da Caldeira do Vulcão das Furnas. Tem densidade de drenagem de 4,65 km⁻¹ e escoamento superficial estimado em 5,69 hm³/ano (CRUZ *et al.*, 1999; SRAA/DRA, 2015). A Lagoa das Furnas (Figura 3.12, a) é parte integrante desta bacia hidrográfica, correspondendo a uma massa de água superficial com uma área do plano de água de 1,87 km², cota a

cerca de 280 m, dimensões de 2x1,6 km, profundidade máxima de 15 metros e um volume armazenado estimado em 14334408 m³ (CARVALHO, 2013).

A Bacia da Ribeira Quente é responsável por drenar toda a parte N, NE, SE e central da Caldeira, perfazendo uma área total de 25,95 km² (SRAA/DRA, 2015), abandonando a depressão vulcânica no seu extremo SE (Figura 3.12, b) e desaguando na freguesia da Ribeira Quente. Apresenta uma descarga total de cerca de 1600 L/s (QUINTELA *et al.*, 1986 *in* CRUZ *et al.*, 1999) e escoamento de 9,75 hm³/ano (SRAA/DRA, 2015). A proporção estimada entre descargas profundas e escoamento é de 0,03 ton/ano para a Ribeira dos Tambores (CRUZ *et al.*, 1999).

Recursos Hídricos Subterrâneos

Para a ilha de São Miguel estão definidas seis massas de água subterrânea distintas (CRUZ, 2001; *in* SRAM, 2012; figura 3.13), com base em critérios de origem estratigráfica, litológica, tectónica e hidrogeológica. No sentido Oeste-Este, têm a designação de Massa de Água das Sete Cidades, Ponta Delgada-Fenais da Luz, Água de Pau, Achada, Furnas-Povoação e Nordeste-Faial da Terra (SRAM, 2012).

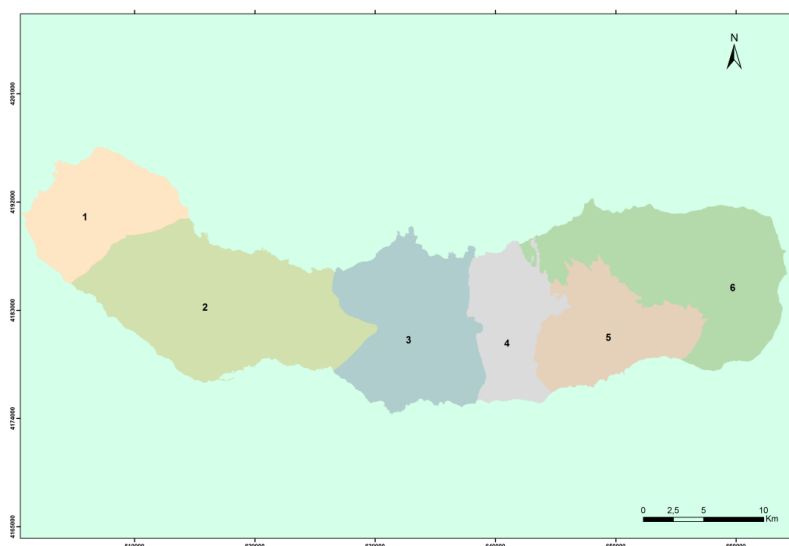


Figura 3.13 – Delimitação das Massas de Água subterrâneas definidas para a ilha de São Miguel (base: SRAA/DRA, 2015).
Da Esquerda para a direita: (1) Sete Cidades; (2) Ponta Delgada-Fenais da Luz; (3) Água de Pau;
(4) Achada; (5) Furnas-Povoação; (6) Nordeste-Faial da Terra

A zona em estudo enquadra-se no Sistema Aquífero Furnas-Povoação (DRA/DROTRH, 2001), que integra a Massa de Água Subterrânea com a mesma designação (SRAA/DRA, 2015). A Massa de Água Subterrânea Furnas-Povoação ocupa uma área da ordem dos 90,81 km² na costa Sul de São Miguel, constituindo cerca de 12,2% da superfície da ilha. É limitada a Oeste pela Massa de Água da Achada e a N, NE e E pela Massa de Água Nordeste-Faial da Terra (SRAA/ DRA, 2015; Figura 3.14).

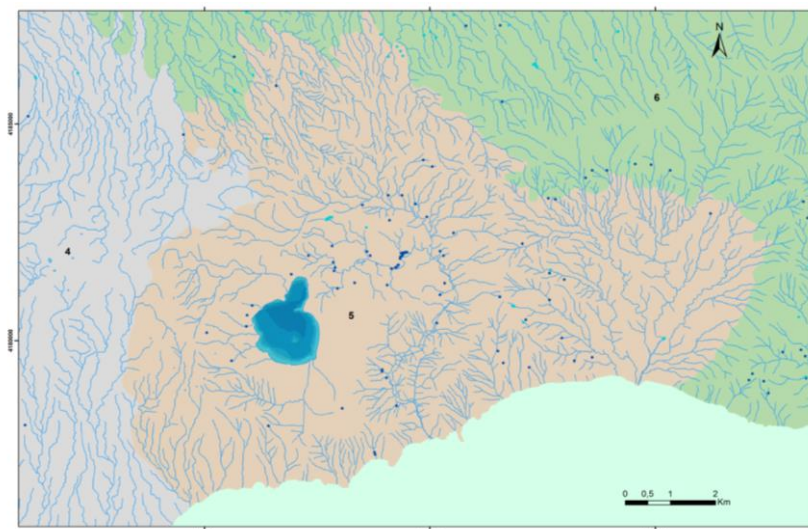


Figura 3.14 – Massa de Água Furnas-Povoação (5, a rosa), limitada a Oeste pela Massa da Achada (4, a roxo) e a N, NE e E pela Massa de Água Nordeste-Faial da Terra (6, a verde). Na figura está indicada a rede hidrográfica a azul, bem como a batimetria da Lagoa das Furnas e as nascentes que constam desta massa de água (pontos azuis). (Base: SRAA/DRA, 2015).¹

Para a maioria das ilhas dos Açores é proposto um modelo hidrogeológico conceptual semelhante ao havaiano (CRUZ, 2004), onde vigoram aquíferos de altitude, que se encontram limitados por filões ou outras discontinuidades e, inferiormente, por níveis de piroclastos finos ou zonas compactas de escoadas do tipo *aa*, e aquíferos de base, estes últimos de reduzido gradiente hidráulico e que representam o meio saturado geral da ilha, de superfície livre, que flutua sobre a água salgada, que é mais densa (SRAA/DRA, 2015). A recarga do aquífero de base dá-se pela transferência de água a partir de aquíferos suspensos, aos quais estão hidraulicamente conectados, podendo também ocorrer de forma direta através da precipitação (e.g. CRUZ, 2004). A Massa de Água Furnas-Povoação corresponde a um sistema misto de aquíferos de base e de altitude porosos e fissurados (SRAA/ DRA, 2015).

De acordo com a estratigrafia proposta por GUEST *et al.* (1999, 2015) para o Vulcão das Furnas, esta massa de água desenvolve-se em formações dos Grupos Inferior, Intermédio e Superior, onde predominam escoadas lávicas e domos traquíticos, depósitos piroclásticos pomíticos de queda e de fluxo, incluindo ignimbritos, *surges* e *lahars* (SRAA/DRA, 2015).

Os valores de recarga estimados para a ilha de São Miguel apresentam taxas de infiltração mínima de 16% e taxas de infiltração máxima de 45%. Relativamente à Massa de Água Furnas-Povoação, é considerado um total de precipitação de 156,31 hm³/ano, disponibilidades hídricas de cerca de 24,73 hm³/ano e uma taxa de recarga de 16% (SRAM, 2012).

A classe de recarga predominante no Vulcão das Furnas é a classe moderada (Figura 3.15), ocorrendo em alguns locais recarga reduzida, em outros recarga elevada (como é o caso da Lagoa das Furnas) e, pontualmente, há zonas de recarga muito elevada. Não parece existir interferência da altitude na definição de zonas de maior recarga. A disponibilidade real da Massa de Água Furnas-Povoação é de 14,8 hm³/ano, considerando uma fração de recarga de 40% dos recursos estimados a longo prazo (SRAM, 2012).

¹ - Mapa elaborado em *ArcGis* com base nos serviços *WMS* disponibilizados no Portal de Informação Geográfica da Direção Regional do Ambiente, consultados através do *site* SIGAM (Sistema de Informação Geográfica do Ambiente e do Mar dos Açores) da SRAA. 15

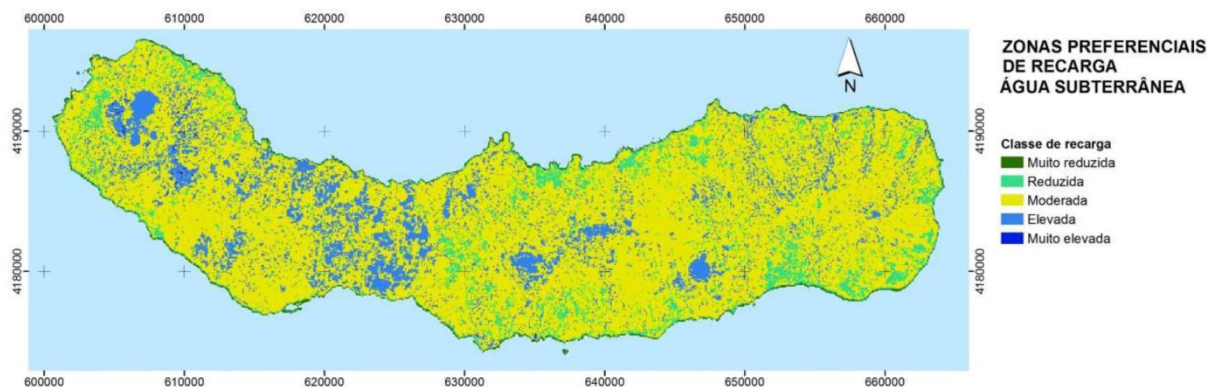


Figura 3.15 - Mapa de zonas preferenciais de recarga da ilha de São Miguel (adaptado de SRAM, 2012).

Os pontos de água associados a esta massa de água apresentam na sua maioria fácies bicarbonatada sódica, condutividade variável (127 a 2860 $\mu\text{s}/\text{cm}$), existindo um número significativo de nascentes minerais, termais e gasocarbónicas, que apresentam um caudal unitário de verão de cerca de 0,5 L/s (SRAA/DRA, 2015). A existência de um sistema hidrotermal profundo no Vulcão das Furnas (profundidade 165 m e pressão de 16 bar; CRUZ *et al.*, 1999) é responsável pela ocorrência de emanções gasosas e campos fumarólicos, cujos principais focos se localizam junto à Lagoa das Furnas, na Chã das Caldeiras (na freguesia das Furnas) e no vale da Ribeira Quente. Estas emanções, principalmente as localizadas na freguesia das Furnas, ocorrem ao longo de uma anomalia de CO_2 , detetada em solos e águas superficiais e subterrâneas, que atravessa o fundo da caldeira ao longo de fraturas de direção geral ONO-ESE e NE-SO. Este fenómeno promove a contaminação de aquíferos de pequena profundidade pelo fluido termal ascendente através de fraturas permeáveis, dando origem à grande diversidade de águas termais e gasocarbónicas existentes na Caldeira do Vulcão das Furnas, que apresentam diferentes temperaturas e quimismos em consequência da incorporação de CO_2 e de vapor hidrotermal rico em gases vulcânicos (principalmente CO_2 e, secundariamente, H_2S , CH_4 e H_2 ; CRUZ *et al.*, 1999; CARVALHO, 2013).

Vários autores têm interpretado a variabilidade composicional das águas subterrâneas a nível ilha (CRUZ *et al.*, 1999; CRUZ & FRANÇA, 2006; FREIRE, 2006; NUNES & CARVALHO, 2009) tendo por base um modelo conceptual da ocorrência de nascentes minerais e termais nos Açores, o qual pode ser também usado para explicar a origem das águas que ocorrem no Vulcão das Furnas (Figura 3.16).

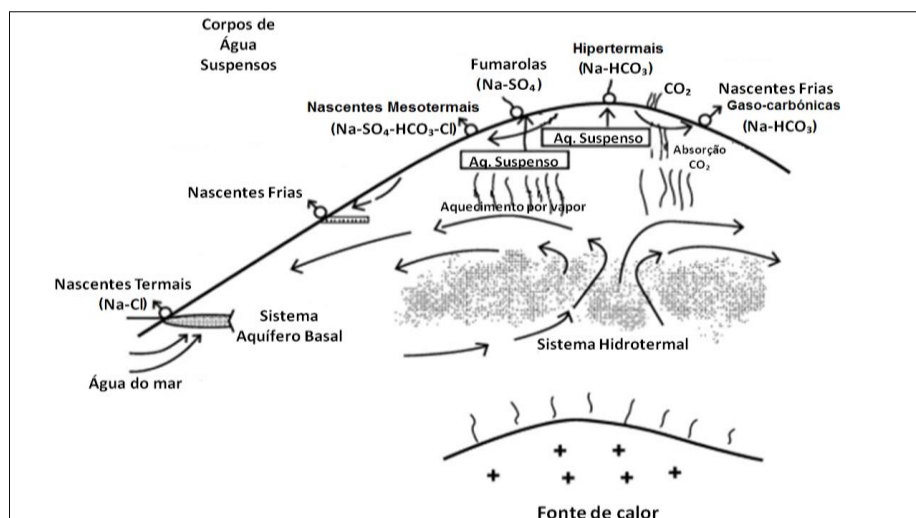


Figura 3.16 – Modelo conceptual da ocorrência de nascentes minerais e termais no arquipélago dos Açores (adaptado de CRUZ & FRANÇA, 2006).

No Vulcão das Furnas ocorrem águas frias gasocarbônicas, águas mesotermiais, hipotermiais e fumarolas (CRUZ *et al.*, 1999; FREIRE, 2006; Figura 3.16). As águas frias gasocarbônicas emergem de aquíferos suspensos contaminados por $\text{CO}_{2(g)}$, apresentando baixa mineralização e pH ligeiramente ácido. As águas mesotermiais são o resultado da contaminação de aquíferos suspensos por vapor hidrotermal enriquecido em gases vulcânicos, que ascende do aquífero hidrotermal profundo. A sua temperatura é variável, dependendo do grau de mistura com vapor hidrotermal. Têm pH ácido a neutro e apresentam mineralização elevada devido à lixiviação ácida das rochas aquíferas hospedeiras. Contêm elevadas concentrações de metais dissolvidos e são enriquecidas em sulfatos e formas reduzidas de enxofre, podendo apresentar, além da fácies Na-HCO_3 , fácies $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$. As águas hipotermiais representam emergências do próprio aquífero termal profundo, que se encontra em ebulição, pelo que a sua temperatura é próxima à de ebulição à pressão atmosférica. Têm pH básico, mineralização muito elevada e é comum a concentração elevada de arsénio e H_2S nestas águas. Segundo CRUZ *et al.*, (1999), as fumarolas representam vapor hidrotermal que ascende do aquífero profundo e condensa à superfície, misturando-se com águas subsuperficiais e de precipitação. O condensado tem pH francamente ácido e mineralização variável, dependendo do contacto com os solos e rochas encaixantes e do grau de mistura com outras águas. A fase gasosa é dominada por CO_2 , e são comuns concentrações elevadas de sulfato (FERREIRA & OSKARSSON, 1991; CRUZ & FRANÇA, 2006).

Por forma a conjugar os diversos aspetos tectónicos e hidrogeológicos que ocorrem no Vulcão das Furnas e que justificam a diversidade de águas neste local, CRUZ *et al.*, (1999) propuseram um modelo conceptual da transferência de massa nas camadas mais superficiais do Vulcão das Furnas, indicado na Figura 3.17. Segundo este modelo, os principais componentes que dão entrada no sistema são a precipitação, o dióxido de carbono e as rochas vulcânicas, cuja lixiviação fornece os sólidos dissolvidos presentes nas águas das Furnas. Os principais componentes móveis do mesmo são o CO_2 e a sílica e o sódio resultantes do processo de lixiviação intensa de rochas siliciosas por parte das águas gasocarbônicas ligeiramente ácidas.

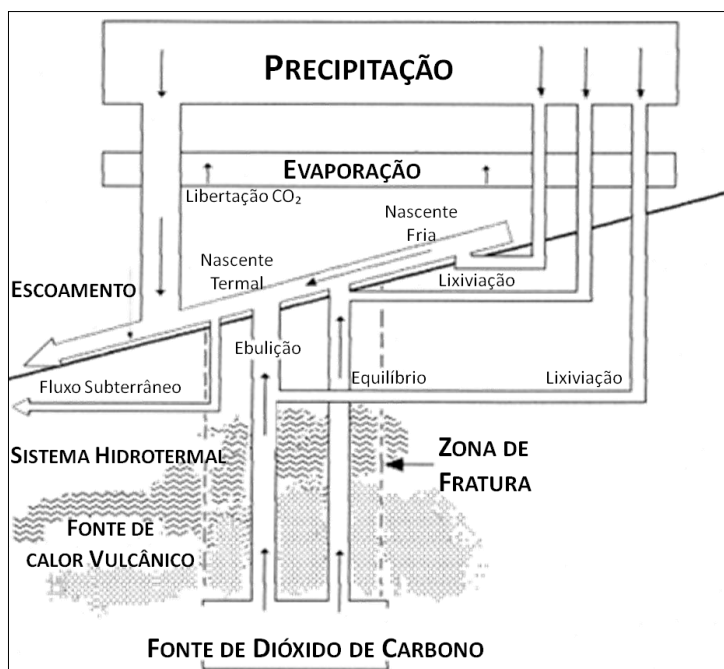


Figura 3.17 – Modelo conceptual da transferência de massa que ocorre nas camadas mais superficiais do Vulcão das Furnas (adaptado de CRUZ *et al.*, 1999).

4. A CONCESSÃO HIDROMINERAL DA “ESTÂNCIA TERMAL DAS FURNAS”

A “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas”, assim designada, foi demarcada pela Direção-Geral de Minas e Serviços Geológicos (Ministério da Economia) a 14 de setembro de 1964 e o seu Alvará de Concessão (alvará nº 6317), publicado no Diário do Governo nº 48, III série, de 26 de fevereiro de 1965, conferia à antiga Junta Geral do Distrito Autónomo de Ponta Delgada “*licença para explorar as nascentes de água mineromedicinal que constituem a Estância Termal das Furnas*”. A área total da concessão é de 50 hectares e o seu relatório de demarcação menciona “*trinta e três nascentes mineromedicinais conhecidas na região das Furnas (...) e sete caldeiras*”, devidamente referenciadas num mapa topográfico à escala 1/2000 da região. Contudo, a legenda do mapa menciona um total de 44 nascentes e caldeiras/fumarolas (34 nascentes e 10 fumarolas, onde uma mesma designação pode corresponder a várias nascentes), das quais 29 nascentes e 6 fumarolas estão localizadas no interior da área de concessão. Destas 29 nascentes, apenas 27 foram concessionadas (por se considerar que duas não representavam águas mineromedicinais).

O relatório de demarcação afirma ainda que “*as nascentes estão por captar ou então têm captações deficientes, as quais não podem, por isso, deixar de ser revistas. É possível (...) que o número de nascentes diminua, pois algumas delas emergem com características semelhantes em fendas muito próximo umas das outras*”, o que evidencia a necessidade de se efetuar uma revisão e atualização das nascentes mencionadas nesse relatório, tanto localizadas dentro da área de concessão como na sua envolvente. Com a presente atualização da “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas” pretende-se verificar o estado atual das nascentes mencionadas, quer relativamente à sua existência e localização, quer relativamente ao número de nascentes integrantes da concessão. Uma vez que os documentos originais atrás referidos também mencionam nascentes exteriores à área de concessão, mas importantes no contexto hidrogeológico da região, optou-se por manter esta metodologia, sendo igualmente estudadas nascentes consideradas relevantes no contexto deste trabalho, independentemente da sua localização na área de concessão, ou de constarem do relatório de demarcação original.

O presente trabalho teve início com a consulta de documentos relativos à concessão hidromineral, nomeadamente excertos do relatório de demarcação da mesma, a carta topográfica 1/2000 que contém a localização das 44 nascentes e fumarolas identificadas e respetiva legenda. Neste processo de consulta de informação, foi preponderante a informação disponibilizada pelo INOVA (Instituto de Inovação Tecnológica dos Açores) e pela DRAIC (Direção Regional de Apoio ao Investimento e Competitividade).

De seguida foi elaborado um levantamento de campo de todas as nascentes localizadas no mapa 1/2000 original, dentro e fora da área de concessão, confirmando a sua localização *in situ*, a sua designação, a existência de mais do que uma emergência com a mesma nomenclatura, acompanhado do levantamento das coordenadas das mesmas (sistema WGS_84, Fuso 26) para posterior implementação em ortofotomapa e base cartográfica (à escala 1:2000) da região das Furnas, com recurso ao software *ArcGIS 10.2.1*. As coordenadas foram obtidas com recurso a um GPS da marca GARMIN, modelo Oregon 650. O erro associado ao aparelho é de ± 3 metros, pelo que se efetuou a correção das coordenadas em gabinete quando necessário, com recurso a carta à escala 1/2000 da Região das Furnas, editada pela S.R.E.S. do Governo Regional dos Açores e datada de 1987 e a ortofotomapa da Região das Furnas, produzido pelo Governo dos Açores, datado de 2005.

Todos os dados obtidos, para um total de 56 nascentes, estão indicados num quadro em anexo, acompanhado de imagens, indicando-se primeiro os pontos identificados nos documentos de 1964 e

que pertencem à concessão, seguidos dos que estão identificados no mapa original mas não são parte integrante da área de concessão. A tabela finaliza com as nascentes e fumarolas identificadas *in situ* mas que não são mencionadas em qualquer documento da época. Este quadro inclui, além da referência pela qual as águas são identificadas na concessão, outras designações comuns que lhe são atribuídas, bem como as coordenadas e altitudes correspondentes.

A área de 50 hectares da “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas” original foi delimitada na forma de um retângulo alongado segundo uma direção ONO-ESE, de 1000 m de comprimento por 500 m de largura. Sobre a mesma foram delimitadas outras duas áreas, de menor dimensão e sem forma geométrica definida, designadas por A e B, que visavam definir “zonas termais” a defender no Plano de Urbanização das Furnas (Figura 4.1).

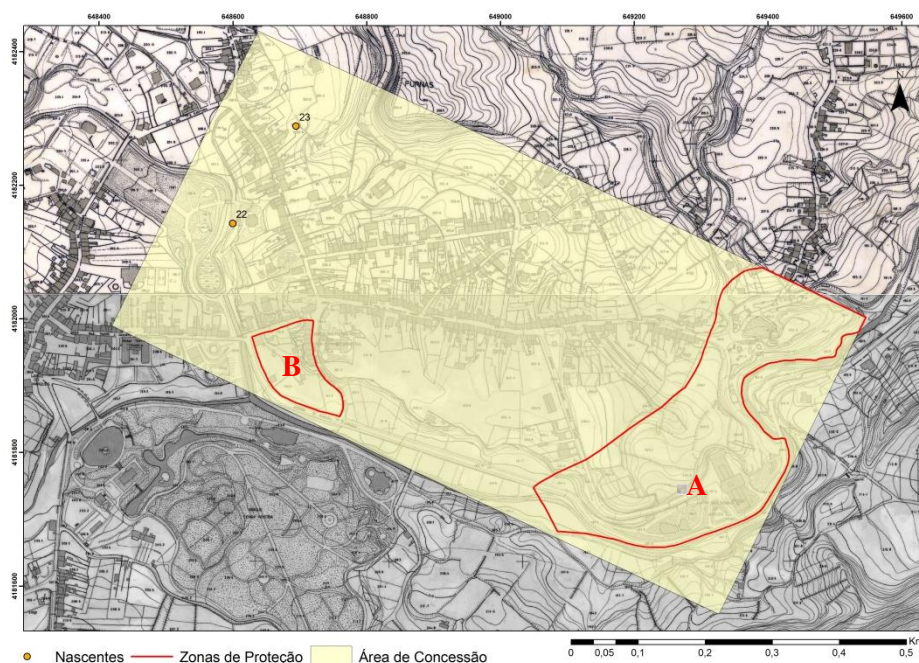


Figura 4.1 – Limite da zona de Concessão (retângulo), Zonas de Proteção A e B e localização das nascentes Fonte da Camarça (22) e Água da Helena (23) (Fonte: DRAIC).

O quadro 11.1 Anexo 1 inclui uma listagem das nascentes mencionadas nos documentos da concessão original, com indicação da sua referência numérica, designação e localização (no interior da concessão, na zona A ou B, ou no exterior da área delimitada).

Conforme mencionado, duas das nascentes localizadas no interior da área de concessão não foram consideradas como mineromedicinais, estando excluídas da mesma. Trata-se das nascentes da Fonte da Camarça (22) e da Água da Helena (23; Figura 4.1), que pertenciam aos proprietários dos terrenos onde emergiam, uma vez que a primeira se encontrava em regime livre e a segunda era, à data, comercializada como água de mesa, de acordo com o relatório de demarcação. Neste contexto, foram incluídas, à data, no mapa da concessão, por se encontrarem dentro da área concessionada, mas salvaguardando que as mesmas não pertenciam à concessão.

Atualmente a nascente da Fonte da Camarça mantém a sua localização original, embora captada de forma diferente do mencionado por ACCIAIUOLI & NARCISO (1940), emergindo num jardim em terreno privado, ao qual foi facultado acesso. A Água da Helena está igualmente localizada em propriedade privada, não sendo comercializada atualmente, nem estando captada. A localização indicada na figura 4.1 é aproximada e a mais provável em função das informações fornecidas.

A zona de proteção B (Figura 4.1) - localizada nas proximidades da igreja de Nossa Senhora da Alegria - surge com o intuito de proteger três nascentes, nomeadamente a Nascente da Água Férrea, ou Banhos da Câmara da Povoação (20), o Poço da Água Férrea (20') e a Nascente do Dr. José Bruno (21).

A localização atual das nascentes 20 e 21 coincide com a reportada em 1964, embora a primeira seja atualmente conhecida por “Banhos Férreos” e a última por “Água Peideira”, de acordo com placa instalada no local (Anexo 1, Fig.11.1). Quanto ao Poço da Água Férrea (20'), não foi possível confirmar a sua existência atual uma vez que, de acordo com os documentos da concessão, encontra-se em terrenos privados, junto de casas que não são habitadas o ano inteiro. Embora haja indicações da sua existência atual, não foi possível aceder ao local em questão.

Ao invés, foi possível identificar a ocorrência de várias outras nascentes férreas no talude onde se encontra a Nascente da Água Férrea, ou Banhos da Câmara da Povoação (BCP) ou Banhos Férreos. A nascente original é então designada por Água Férrea ou BCP I, por ser a nascente que abastecia o edifício balnear e restaurante dos Banhos Férreos, localizados nas imediações. As duas nascentes localizadas para Sul desta, e captadas nas mesmas condições, são designadas por Água Férrea ou BCP II e III (Figura 4.2) e são conhecidas há muito nesta localização (cf. FREIRE, 2006). Na continuação destas para SE parecem existir outras emergências, mas não foi possível confirmar a sua localização e proceder a amostragem por se encontrarem em terrenos privados. O Poço da Água Férrea (20') estará localizado neste alinhamento.



Figura 4.2 – Localização das nascentes Água Férrea ou BCP I (ou Banhos Férreos; ref. 20), Água Férrea ou BCP II e Água Férrea ou BCP III.

Ainda nesta zona, e para N da nascente Água Férrea ou BCP I (20), verificou-se a existência de outras nascentes semelhantes, num terreno privado, mas ao qual foi possível aceder. Conforme mostra a figura 4.3, no talude do terreno surgem uma série de emergências, de maior ou menor caudal, de características semelhantes às da Água Férrea ou BCP I. Estas novas emergências foram designadas por Água Férrea ou BCP IV e Água Férrea ou BCP V, para as duas emergências de maior caudal e que permitiam colheita de amostra para posterior comparação com as restantes nascentes Água Férrea ou BCP (cf. Capítulo 6).

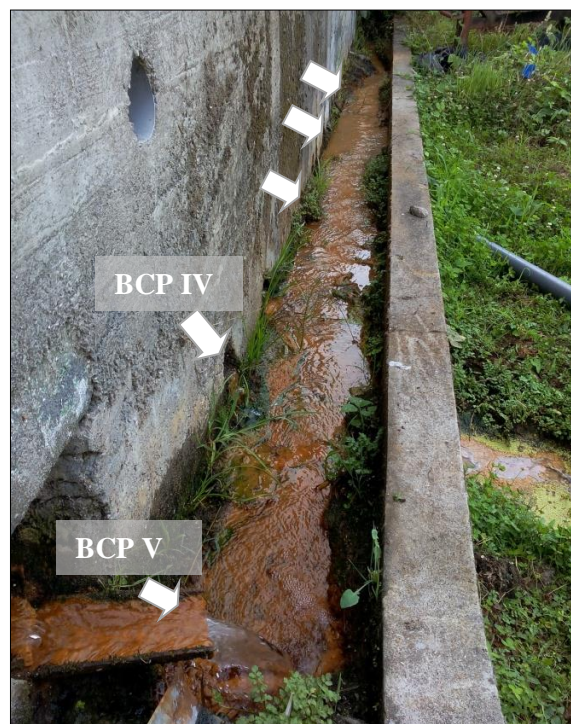


Figura 4.3 – Localização das nascentes Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação (BCP) IV e Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação (BCP) V, com indicação de outras emergências presentes no mesmo local.

Estas emergências apresentam temperaturas crescentes para Sul, com a Água Férrea ou BCP V a apresentar 25,9°C (sugerindo, mesmo pela forma como está captada, alguma mistura com águas de escorrência superficial), a Água Férrea ou BCP IV com 35,6°C e uma das emergências no final do talude a apresentar 38,0°C, à qual se segue a nascente nº 20 (Água Férrea ou BCP I) com 39°C. Na figura pode ser consultada a disposição atual de todas as emergências Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação (BCP) ou Banhos Férreos.

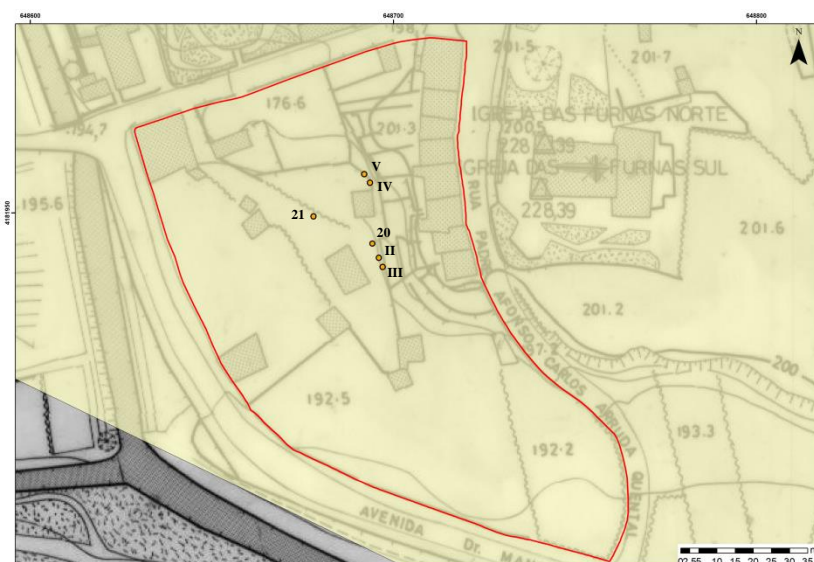


Figura 4.4 – Localização das nascentes Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação ou Banhos Férreos I (20), Dr. José Bruno (21) e Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação II, III, IV e V.

Relativamente à zona de proteção A, e dada a densidade de nascentes nesta zona, optou-se por dividir a mesma em duas áreas distintas, uma a SO, designada genericamente por Jardim das Termas,

e outra a NE, designada por Chã das Caldeiras. Entre ambas estão localizadas duas nascentes, conforme assinalado na Figura 4.5.

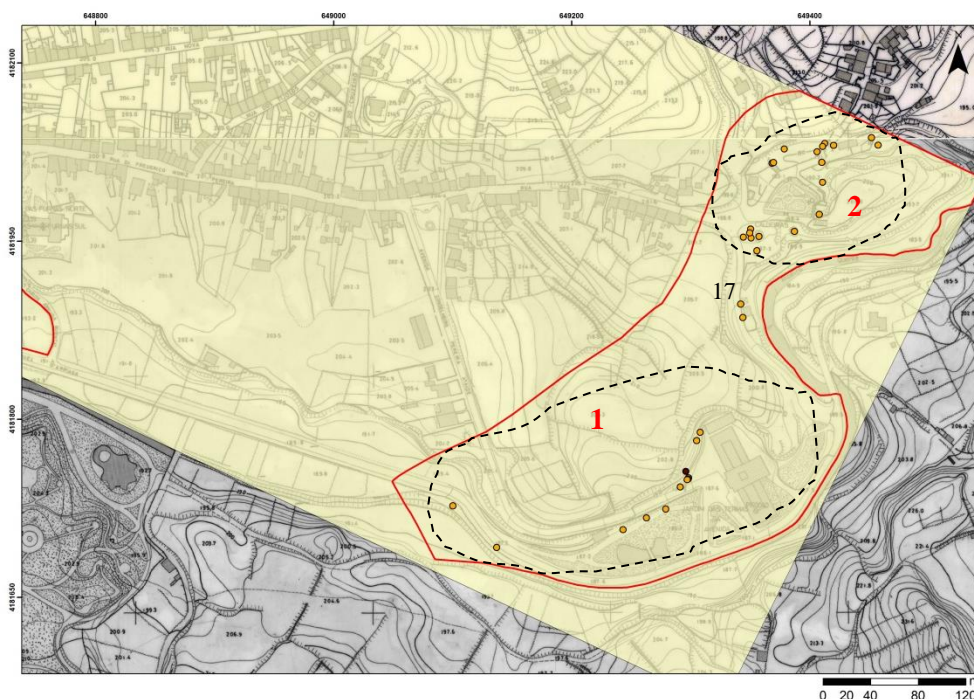


Figura 4.5 – Nascentes localizadas atualmente na Zona de Proteção A, distribuídas pelo Jardim das Termas (área 1), pela Chã das Caldeiras (área 2), ou entre as duas áreas (cf. 17). O ponto escuro indica a nascente Quenturas.

A nascente assinalada na Figura 4.5 com a referência 17 corresponde à Nascente do Padre José, que pertence à concessão, sendo por vezes designada por Padre José (escadas) uma vez que partilha a sua designação com a outra emergência assinalada a Sul e designada por Padre José (casa de chá). Com o intuito de manter, sempre que possível, as designações originais, a nascente 17 será doravante designada apenas por Padre José, conforme os documentos da concessão, e a outra emergência pela designação atrás apresentada.

A localização atual das nascentes do Jardim das Termas (área 1 da Figura 4.5) pode ser consultada mais em detalhe na Figura 4.6, incluindo aquelas referidas na concessão (identificadas pela respetiva referência) e outras nascentes agora identificadas e que não constam dos documentos da concessão (sem referência associada).

Face aos documentos originais da concessão, verifica-se que as nascentes Grutinha I ou Ernesto Correia (5), Grutinha II (6) e Torno (7) não sofreram alterações (Anexo 1, Fig. 11.2 a 11.4), apesar de a nascente Grutinha II ser composta atualmente por três bicas distintas, o que não é mencionado no relatório de 1964.

A Nascente do Poço (9), também designada por Pocinha ou Poça da Tia Silvina está localizada a Sul da estrada com uma única emergência (Figura 4.6; Anexo 1, Fig. 11.5), quando na concessão foram identificadas duas nascentes com esta designação.

No caso da Nascente da Morangueira (8), a sua localização sofreu uma ligeira alteração, sendo hoje em dia canalizada para a berma Sul da estrada, quando à altura da definição da concessão surgia do lado norte da estrada (Figura 4.6; Anexo 1, Fig. 11.6).

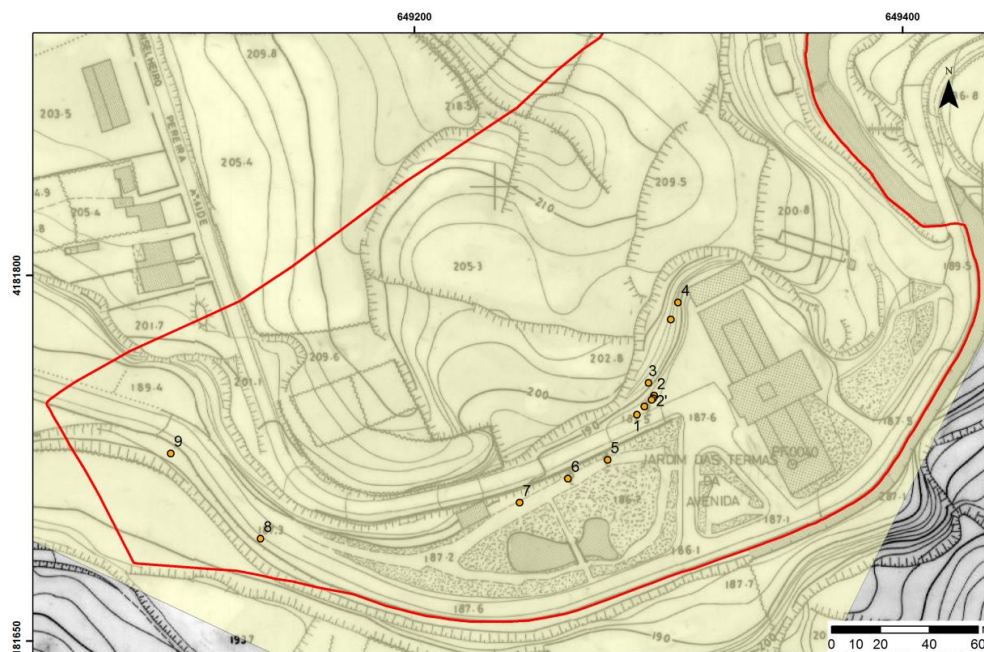


Figura 4.6 – Nascentes (circunferências) localizadas atualmente na zona do Jardim das Termas.

A nascente das Quenturas (também designada Água Férrea das Quenturas) apresenta atualmente apenas uma emergência (Anexo 1, Fig.11.7), face às três originais (3, 3' e 3''). Esta nascente foi recentemente sujeita a trabalhos de limpeza, requalificação e melhoramento, encontrando-se neste momento captada para abastecimento do balneário termal que se encontra nas imediações (Furnas Boutique Hotel Thermal & Spa).

As Nascentes do Rego (1, 1' e 1'') surgem no talude a SSW da nascente das Quenturas, e são compostas por uma série de emergências que ocorrem ao longo do mesmo. No entanto, atualmente estas emergências perderam alguma expressão devido a obras de embelezamento da via, que ditaram a canalização das mesmas (Anexo 1; Fig. 11.8 e 11.9). Atualmente é considerada uma Nascente do Rego (1) junto às escadas de acesso à nascente das Quenturas, que resulta da canalização anteriormente mencionada. Existe outra nascente, localizada já nas escadas referidas (Anexo 1, Fig.11.10), que tem demonstrado alguma expressão, sendo inventariada sob a designação de Rego II.

Para as nascentes das Três Bicas (também chamadas de Quenturas) os documentos de 1964 apenas mencionam duas nascentes (2 e 2'), apesar da sua designação. Após análise, verifica-se que estas correspondem à bica direita (referida como 2) e à bica centro (designada como 2'), que são as bicas de água quente. A bica esquerda, sendo fria, possivelmente não suscitou interesse do ponto de vista hidromineral, não sendo incluída na concessão. Na Figura 11.11 do Anexo 1 pode ser consultado registo fotográfico atual das nascentes das Três Bicas.

A Nascente da Encosta conta atualmente com duas emergências, designadas por nascente da Encosta-Direita, a indicada na concessão e referida como 4, e a nascente da Encosta-Esquerda, não incluída na concessão hidromineral. A sua localização pode ser consultada na figura 4.6, encontrando-se a SO da nascente marcada como "4".

É importante referir que o talude que se encontra entre as nascentes 2, 2', 3 e 4 apresenta uma série de emergências, muitas delas com aparência férrea, com maior ou menor caudal, mas que não se encontram captadas. A sua água é canalizada numa vala que segue pela base do talude até atingir uma

caixa que se encontra no final do mesmo, onde, em conjunto com a água coletada de outras nascentes, é encaminhada para a ribeira adjacente (Anexo 1, Fig.11.12).

Na Chã das Caldeiras (área 2 na imagem 4.5) emergem nascentes e fumarolas *s.l* (popularmente designadas por Caldeiras). Nas figuras 4.7 e 4.8 estão localizadas, respetivamente, as nascentes e as fumarolas presentes, sendo que aquelas que constam dos documentos da concessão de 1964 são identificadas pelas respetivas referências.

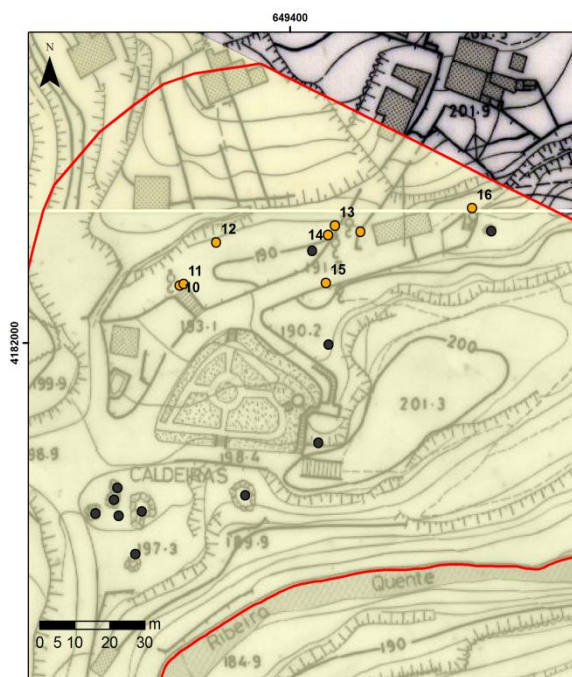


Figura 4.7 - As nascentes (círculos claros) da concessão de 1964, com a respetiva referência.

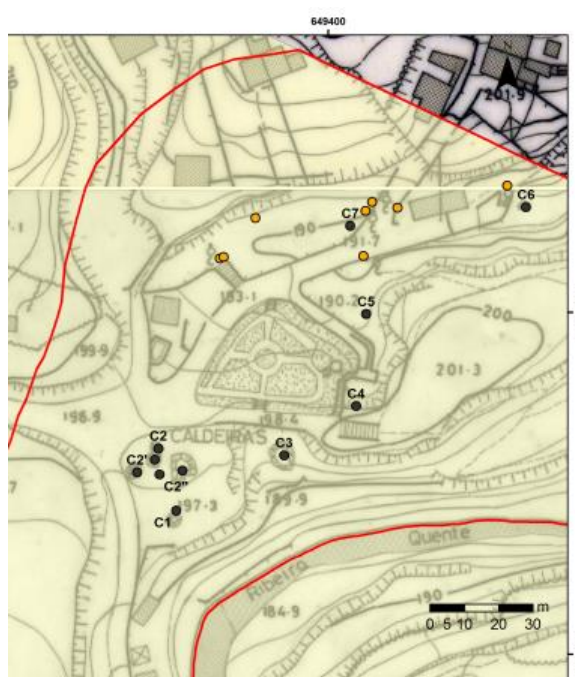


Figura 4.8 - As fumarolas (círculos escuros) da concessão de 1964, com a respetiva referência.

Verifica-se que as nascentes da Água Azeda do Rebentão (13), da Bica da Água Santa (15) e da Água Azeda (16) - Figura 4.7 - salvo pequenos ajustes de localização na carta atual, não sofreram grandes alterações de localização desde a sua inventariação à data da concessão (Anexo 1, Fig. 11.13, a 11.15). A nascente Pimentel e Castro (14) também não sofreu alterações, ressalvando-se que hoje em dia é mais conhecida pela designação Dr. Diniz (Anexo 1; Fig.11.16).

Nos documentos da concessão, as nascentes Miguel Henriques (10) e Água da Prata (11) - Figura 4.7 – têm localização oposta à observada hoje em dia (Anexo 1; Fig.11.17). Verifica-se ainda que no relatório de demarcação são consideradas pelo menos duas nascentes Água da Prata (10 e 10'), existindo apenas uma atualmente.

A nascente designada por Chalet Frio (12), mantém a sua localização, no talude a NE das águas 10 e 11 (Figura 4.7). Emerge numa estrutura de cimento, com baixo caudal e poucas condições de colheita, sem acesso de luz solar, com cheiro intenso a enxofre e incrustações do mesmo nas diversas paredes da estrutura (Anexo 1; Fig.11.18). Atualmente existe uma nascente com esta designação na Chã das Caldeiras, localizada a Este das nascentes 13 e 14, junto ao edifício do OMIC – Observatório Microbiano dos Açores, sem referência (Figura 4.7) e que não consta da concessão. Adquiriu esta designação por ser fria e alimentar os antigos Banhos do Chalet (atual edifício do OMIC), sendo agora designada por Chalet Frio-Banhos, para a diferenciar da nascente 12 da concessão de 1964 (Anexo 1; Figura 11.19).

As fumarolas presentes nesta zona estão referenciadas de C1 a C7 (Anexo 1, Quadro 11.1 e Fig. 11.20 a 11.27), verificando-se que a Caldeira Grande (C1), do Asmodeu (C3; Anexo 1, Fig.11.20), de Pero Botelho ou das Lamas (C4; Anexo 1, Fig.11.21), do Esguicho (C5; Anexo 1, Fig.11.22) e do Caldeirão do Chalet (C7) apenas requereram pequenos ajustes de localização. As caldeiras C1e C7 têm a particularidade de apresentar uma bica onde emerge a água quente (Anexo 1; Fig.11.23 a 11.25) e que, normalmente, são utilizadas aquando da colheita de amostra.

A Norte da Caldeira Grande existe um aglomerado de fumarolas do tipo “*steaming ground*”, que constituem as Caldeiras Secas (C2), localizadas no mapa 1/2000 da concessão, mas que não são referidas no relatório de demarcação da mesma, provavelmente por não terem importância do ponto de vista hidromineral. Com a ajuda das placas identificadoras que se encontram no local (Anexo 1; Fig.11.26) foi possível atualizar a localização e número destas fumarolas (C2, C2’ e C2’’, atualmente), bem como identificar fumarolas do tipo “*mud-pools*” presentes no local e que não constam da concessão, como a Caldeira Pequena e as Caldeiras Barrentas (Anexo 1; Fig.11.26).

A Caldeira dos Vimes (C6), mais afastada das restantes, foi facilmente identificada uma vez que a sua localização se mantém semelhante e possui placa identificativa. Chama-se a atenção para o facto de existir outra fumarola de menores dimensões a NNO da C6, com 74° de temperatura, que não é mencionada nos documentos da concessão, e para a qual não se conhece qualquer designação (Anexo 1; Fig.11.27). Apesar de a Caldeira dos Vimes manter a sua posição geográfica sofreu alterações ao longo do tempo, nomeadamente a nível da temperatura, que se constou ser pouco superior a 30°C atualmente e bastante inferior à das restantes caldeiras da concessão (e.g. com T° superior a ≈80°, cf. Capítulo 6), facto que chamou a atenção. A compilação de mais informação acerca desta fumarola demonstrou que a mesma tinha uma temperatura de 73°C em 2006 (*in* FREIRE, 2006), que se manteve semelhante no ano seguinte, mas diminuiu para 49°C em 2008 (dados de INOVA) e atualmente se encontra nos 31°C. Os valores de pH e condutividade mantiveram-se semelhantes ao longo dos 10 anos (≈5,3 e 300μS/cm) mas o valor de CO₂ livre tem sofrido flutuações, apresentando hoje o valor mais elevado. Uma avaliação *in situ* permitiu notar que atualmente está a ser canalizada uma água fria, provavelmente gasocarbónica dada a sua localização, para o interior desta caldeira. Tal pode explicar a consequente descida de temperatura da nascente a partir de 2008, bem como o valor atual de CO₂ livre presente na mesma (cf. Capítulo 6; Anexo 1, Fig.11.27).

Inventariou-se igualmente uma fumarola na zona da Lagoa das Furnas, designada por Caldeira da Lagoa das Furnas e englobada numa zona de atividade fumarólica genericamente designada como “Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas” e que apresenta características distintas das restantes fumarolas mencionadas (cf. capítulo 6), logo com importância no contexto da hidrologia das Furnas. A sua localização e registo fotográfico podem ser consultados nas Figuras 11.28 e 11.29 do Anexo 1.

De acordo com as informações do Quadro 11.1, os documentos da concessão mencionam cinco nascentes que se localizam fora da área de concessão, mas com importância mineromedicinal. Trata-se das nascentes da Serra do Trigo (18), da Água do Vale de Alcântara (19), da Nascente do Cabaço (24), da Nascente da Ribeira de Nossa Senhora (25) e do Sanguinhal (26). As suas localizações atuais podem ser consultadas na Figura 11.30 do Anexo 1.

No caso das nascentes 18 e 19, localizadas para E dos limites da concessão, e da nascente 26, a que se encontra mais a SO, apenas foi necessário proceder ao levantamento das coordenadas atuais e efetuar os respetivos ajustes. A água da nascente da Serra do Trigo (18) é comercializada atualmente sob o nome de *Magnificat*, tendo já sido comercializada como água de mesa sob o nome Serra do

Trigo (ACCIAIUOLI & NARCISO, 1940). A Água do Vale de Alcântara (19) é referida em alguns documentos antigos (CARVALHO, 1955) como nascente Dr. Frederico.

Relativamente à nascente da Ribeira de Nossa Senhora (25), o facto de esta designação ter caído em desuso gerou alguma confusão. No entanto, conjugando a sua localização nos mapas da concessão com descrições presentes nos documentos da mesma, foi possível concluir que se trata da nascente termal que abastece o tanque termal do Parque Terra Nostra, correspondendo a uma nascente designada atualmente por Terra Nostra I. Nas suas imediações está localizada outra nascente, denominada Poça da Dona Beija ou Terra Nostra II, englobada na zona de Banhos da Poça da Dona Beija, que apresenta características semelhantes, mas que não consta da “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas”.

A Nascente do Cabaço (24), também referida como Banhos dos Cabaços (ACCIAIUOLI & NARCISO, 1940) abastecia uma casa de banhos, a N da nascente da Ribeira de Nossa Senhora (RNS). No entanto, há muito que a casa de banhos desapareceu, não deixando vestígios. Na tentativa de encontrar indícios da presença da nascente, foram efetuadas deslocações ao local onde se encontravam os banhos e a respetiva nascente, com base em registos fotográficos de ACCIAIUOLI & NARCISO (1940; Figura 4.9) e nas coordenadas dos Banhos dos Cabaços que constam da base de dados HYDROVULC (e.g. FREIRE, 2006).



Figura 4.9 – Registo fotográfico dos Banhos Cabaços presente em ACCIAIUOLI & NARCISO (1940; Vista de Sul para Norte).

Pretendia-se encontrar indícios desta nascente com base nos resultados de uma análise realizada na mesma (HERCULANO, 1955), onde é descrita como férrea, com 39°C de temperatura, pH de 5,85 e condutividade elétrica de 587 $\mu\text{S}/\text{cm}$. O facto de o local dos antigos banhos ser atualmente um inhamaal de dimensões consideráveis dificultou a procura de indícios da nascente e, apesar de se ter percorrido toda a área (Anexo 1; Figura 11.31), não se encontrou nenhuma exsurgência com as características pretendidas.

Em alternativa, optou-se por percorrer a RNS para montante da Poça da Dona Beija, até aos inhamaais referidos anteriormente. Ao percorrer a ribeira foram identificados vários indícios da presença de águas férreas, o que era expectável, visto que tanto a nascente da RNS ou Terra Nostra I (25) como a Poça da Dona Beija ou Terra Nostra II são consideradas férreas. Estas escorrências férreas atingem a sua maior expressão no interior do túnel que sustenta a estrada regional que ladeia o inhamaal onde se encontrava a nascente e os banhos do Cabaço. Estas exsurgências, que ocorrem nas paredes do túnel, estando algumas canalizadas em tubos (Anexo 1; Fig.11.32 a 11.34), são

marcadamente férreas e podem representar uma expressão atual da antiga nascente do Cabaço e outras nascentes férreas localizadas neste local, que com o passar do tempo e execução de obras de melhoramento, perderam a sua forma original e passaram a exsurgir desta forma. Pelo mencionado, aceita-se que as coordenadas de FREIRE (2006) representam uma localização plausível desta nascente, sendo as mesmas adotadas neste trabalho.

Ainda neste local, deve referir-se a existência de outras nascentes de interesse no leito da Ribeira de Nossa Senhora, identificados no decurso do presente trabalho. Estas nascentes situam-se alguns metros a montante da Poça da Dona Beija e apresentam temperatura semelhante à da nascente da Ribeira de Nossa Senhora ou Terra Nostra I (25) e à temperatura reportada para a nascente do Cabaço (24). Estas nascentes foram agora designadas por Ribeira de Nossa Senhora II, III e IV, apresentando as nascentes RNS II e RNS III temperatura de 42°C e a nascente RNS IV 41,4°C.

Nas Figuras 4.10 e 4.11 é possível consultar o registo fotográfico das nascentes da Ribeira de Nossa Senhora II, III e IV e a localização de todas as nascentes inventariadas na zona envolvente da concessão de 1964.



Figura 4.10– Registo fotográfico das nascentes RNS II e III (T=42°C) e nascente RNS IV (T=41,4°C).

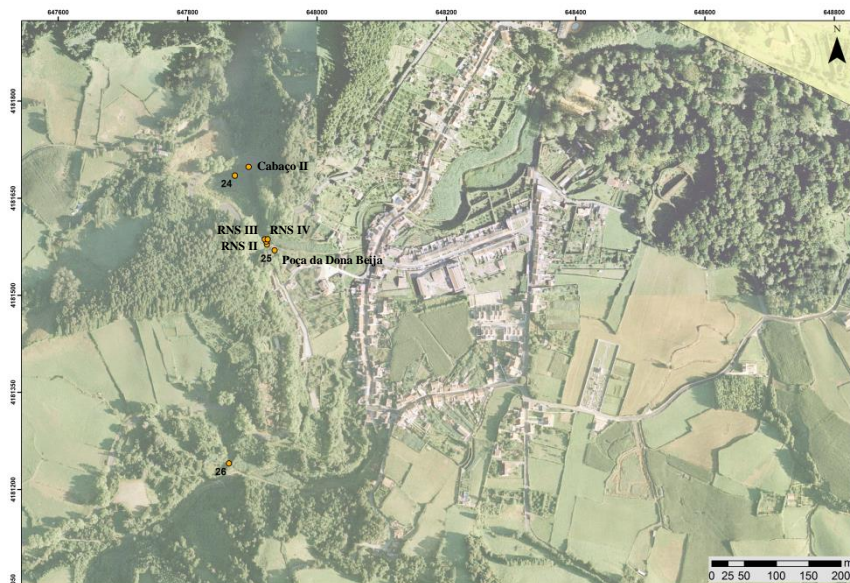


Figura 4.11 – Localização das nascentes do Cabaço (24), Cabaço II, Ribeira de Nossa Senhora (25), Poça da Dona Beija, Sanguinhal (26) e das nascentes da Ribeira da Nossa Senhora II, III e IV (Base: ortofotomapa SRCTE).

Conclui-se a inventariação das nascentes com uma referência a outras três nascentes que se localizam na freguesia das Furnas, designadas por Gloria Patri, Água do Rego ou Misturas e Tio José de Sousa. A nascente Gloria Patri está localizada a NO dos limites da área de concessão e as outras estão localizadas junto ao vértice superior direito da área de concessão, conforme é possível verificar na Figura 4.12 e na Figura 11.35 do Anexo 1. A água da nascente Gloria Patri é atualmente comercializada sob a mesma designação, existindo, além da nascente, duas bicas de acesso público localizadas na freguesia das Furnas (Anexo 1, Fig.11.36).

A nascente da Água do Rego, ou Misturas, surge a Este da Água Azeda (16), com boas condições de captação e beneficiando de uma placa de identificação, à semelhança de outras nascentes localizadas no Jardim das Termas e na Chã das Caldeiras (Anexo 1, Fig.11.37).

A nascente Tio José de Sousa surge na base de um talude, a NE da Água Azeda (16), com poucas condições de colheita, embora tenha sofrido uma obra de intervenção, com a abertura de um roço que facilita a sua escorrência (Anexo 1; Figura 11.38).

Conforme mencionado no início deste capítulo, toda a informação obtida no levantamento das várias nascentes e fumarolas pertencentes à “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas” e sua envolvente está compilada num quadro (Quadro 11.2) que pode ser consultado no Anexo 1. Deste quadro constam todas as nascentes e fumarolas mencionadas ao longo do capítulo, as suas designações e referências de acordo com os documentos da concessão, bem como outras designações que lhe são atribuídas. Constan ainda as coordenadas UTM obtidas para cada ponto (M, P) e a sua altitude, bem como a indicação de integrarem ou não a área de concessão. A Figura 4.12 apresenta a implantação de todas as nascentes e fumarolas num ortofotomapa do Vulcão das Furnas, de acordo com as coordenadas obtidas.

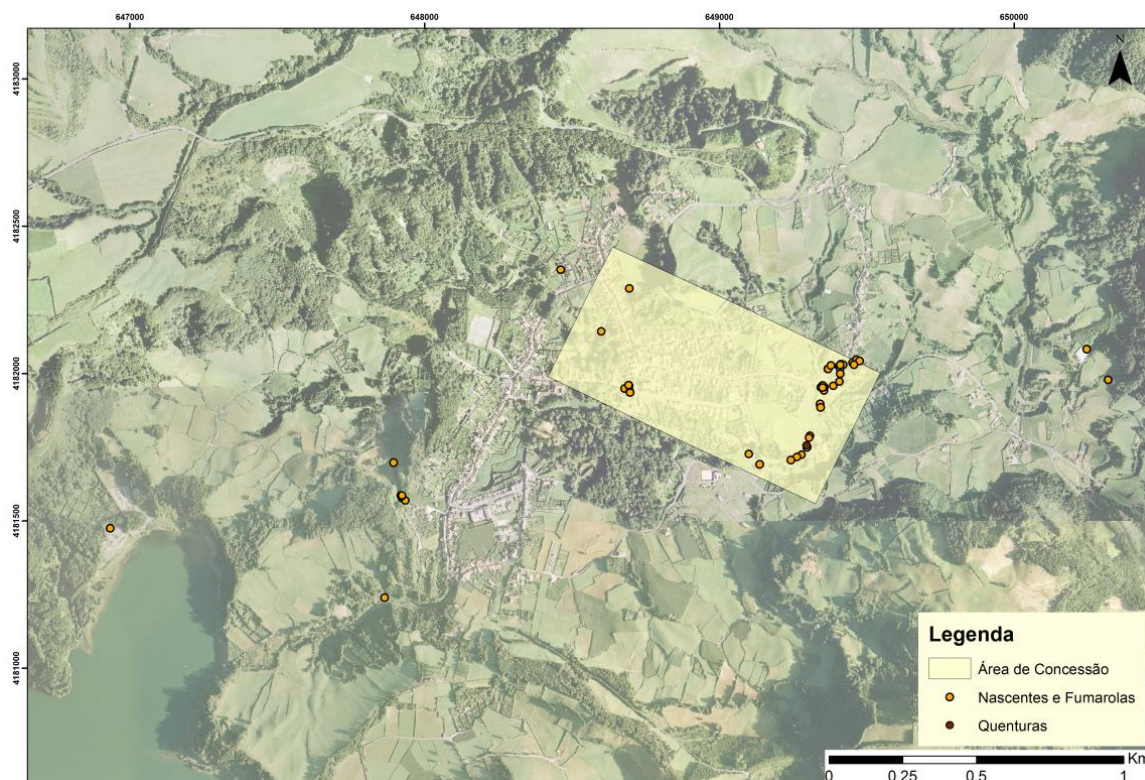


Figura 4.12 – Localização das diversas nascentes e fumarolas integradas na área da “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas” e zona envolvente (Base: ortofotomapa SRCTE).

5. METODOLOGIA

5.1. Amostragem

Entre outubro de 2015 e agosto de 2016 foram efetuadas diversas campanhas de inventariação e amostragem com vista à recolha de águas de diversas nascentes e fumarolas situadas na Caldeira do Vulcão das Furnas, com o intuito de melhor caracterizar estes pontos de água e auxiliar o estudo da Nascente das Quenturas ou Água Férrea das Quenturas. Foram realizadas análises físico-químicas aos principais componentes das águas, incluindo os elementos vestigiais, bem como análises isotópicas de oxigénio (^{18}O), deutério (^2H) e trítio (^3H).

No total foram inventariados e localizados 55 pontos (sendo 43 nascentes e 12 fumarolas), a que acrescem as duas nascentes não estudadas (Cabaços e Poço da Água Férrea) e duas amostras da Lagoa das Furnas, num total de 59 pontos. Destas diversas nascentes e fumarolas inventariadas no interior e envolvente da área de concessão foram inicialmente selecionadas 33 para análise físico-química, sendo este número posteriormente alargado a um total de 42, principalmente na campanha de abril de 2016. Para os elementos vestigiais foram analisadas 30 amostras, correspondendo 28 a nascentes e fumarolas e duas a amostras colhidas na Lagoa das Furnas.

A determinação de ^{18}O e ^2H foi efetuada para um total de 29 nascentes e fumarolas, bem como nos dois pontos da Lagoa das Furnas, sendo também apresentados nesta dissertação dados de outros autores para algumas das nascentes não amostradas agora. Foram, ainda, colhidas seis amostras de águas de precipitação para análise das mesmas razões isotópicas (cf. Figura 3.8). O trítio foi determinado em 8 amostras de nascentes, embora estivessem programadas 11 análises (que incluíam a nascente Quenturas), não se realizando as últimas 3 devido a avaria num aparelho de medição, o que impossibilitou a obtenção das análises em tempo útil.

No âmbito desta dissertação estão, assim, inventariados 59 pontos de água (incluindo os dois pontos da Lagoa das Furnas), cujas designações, número da amostra, referência na concessão e coordenadas podem ser consultadas no Quadro 11.3 do Anexo 2. Por uma questão de uniformização, são também incluídas neste quadro as referências atribuídas a estes pontos de água no Plano de Gestão de Rede Hidrográfica (PGRH) dos Açores 2016-2021, relativo à Ilha de São Miguel, com base primeiramente nas coordenadas apresentadas, e de seguida nas designações. Em jeito de síntese, indica-se no quadro 5.1 quais as determinações analíticas realizadas nestes 59 pontos.

Quadro 5.1– Listagem dos pontos inventariados, com indicação das determinações analíticas efetuadas.

Nº Amostra	Ponto Inventariado	Tipologia	Análise FQ		Análise Isotópica		
			Parâmetros campo e elementos maiores	Elementos menores e traço	^{18}O (‰)	^2H (‰)	^3H (U.T)
1	Água Azeda do Rebentão	Nascente	x	x	x	x	-
2	Água Azeda	Nascente	x	x	x	x	-
3	Caldeirão do Chalet	Fumarola	x	x	x	x	-
4	Miguel Henriques	Nascente	x	x	x	x	-
5	Quenturas	Nascente	x	x	x	x	x
6	Chalet Frio - Banhos	Nascente	x	x	x	x	-
7	Padre José	Nascente	x	x	x	x	-
8	Água da Prata	Nascente	x	x	x	x	-

9	Bica da Água Santa	Nascente	x	x	x	x	-
10	Água Férrea I	Nascente	x	x	x	x	-
11	Chalet Frio	Nascente	x	x	x	x	-
12	Caldeira Grande	Fumarola	x	x	x	x	-
13	Pimentel e Castro	Nascente	x	x	x	x	-
14	Dr. José Bruno	Nascente	x	x	x	x	-
15	Gloria Patri	Nascente ³	x	x	x	x	x
16	Grutinha I	Nascente	x	x	x	x	-
17	Grutinha II	Nascente	x	x	x	x	-
18	Lagoa das Furnas 1	Lagoa	-	x	x	x	-
19	Lagoa das Furnas 2	Lagoa	-	x	x	x	-
20	Morangueira	Nascente	x	x	x	x	-
21	Torno	Nascente	x	x	x	x	x
22	Rego	Nascente	x	x	x	x	-
23	Três Bicas - Centro	Nascente	x	x	x	x	x
24	Três Bicas - Direita	Nascente	x	x	x	x	x
25	Três Bicas - Esquerda	Nascente	x	x	x	x	x
26	Ribeira de Nossa Senhora	Nascente	x	x	x	x	x
27	Poça da Dona Beija	Nascente	x	x	x	x	x
28	Fonte da Camarça	Nascente	x	x	x	x	-
29	Poço	Nascente	x	x	x	x	x
30	Encosta - Direita	Nascente	x	x	x	x	x
31	Encosta - Esquerda	Nascente ²	x	-	-	-	-
32	Tio José de Sousa	Nascente	x	-	-	-	-
33	Água do Rego	Nascente	x	-	x ¹	x ¹	-
34	Sanguinhal	Nascente	x	-	x	x	x
35	Água do Vale de Alcântara	Nascente	x	-			
36	Padre José (casa de chá)	Nascente	x	-	-	-	-
37	Água da Helena	Nascente	Nascente localizada; Sem condições de recolha				
38	Serra do Trigo	Nascente	No interior de fábrica de engarrafamento		x ¹	x ¹	-
39	Caldeira da Lagoa das Furnas	Fumarola	x	-	-	-	-
40	Caldeira do Asmodeu	Fumarola	x	-	x ¹	x ¹	-
41	Caldeira do Esguicho	Fumarola	x	-	-	-	-
42	Caldeira dos Vimes	Fumarola	x	-	-	-	-
43	Caldeiras Barrentas	Fumarola	Sem água para recolha				
44	Caldeira Pequena	Fumarola	Sem água para recolha				

45	Caldeira de Pero Botelho	Fumarola	Sem água para recolha				
46	Caldeiras Secas 1	Fumarola	Sem água para recolha				
47	Caldeiras Secas 2	Fumarola	Sem água para recolha				
48	Caldeiras Secas 3	Fumarola	Sem água para recolha				
49	Água Férrea II	Nascente	Nascente localizada; Sem condições de recolha				
50	Água Férrea III	Nascente	Nascente localizada; Sem condições de recolha				
51	Água Férrea IV	Nascente ²	x	-	-	-	-
52	Água Férrea V	Nascente ²	x	-	-	-	-
53	Cabaço	Nascente	Não existe atualmente				
54	Cabaço II	Nascente ²	x	-	-	-	-
55	Ribeira Nossa Senhora II	Nascente ²	x	-	-	-	-
56	Ribeira Nossa Senhora III	Nascente ²	Nascente localizada; Sem condições de recolha				
57	Ribeira Nossa Senhora IV	Nascente ²	Nascente localizada; Sem condições de recolha				
58	Poço da Água Férrea	Nascente	Localização desconhecida				
59	Rego II	Nascente ²	Nascente localizada; Sem condições de recolha				

(x): Parâmetros analisados
 (-): Parâmetros não analisados

¹ - Dados de outros autores
² - Novas emergências
³ - Bica pública

5.2. Determinações Analíticas em Campo

Para todas as nascentes e fumarolas foram medidos *in situ* os parâmetros temperatura, pH, condutividade elétrica e potencial redox, recorrendo a termómetros e potenciómetros com os respetivos elétrodos seletivos. Em campanhas iniciais o CO₂ livre foi determinado em laboratório; porém, em campanhas mais recentes o mesmo foi determinado em campo por titulação, com uma solução 1/44M de NaOH, até obter pH de 8,3. Sendo a determinação analítica do sulfureto de hidrogénio realizada em laboratório, a amostragem envolveu a colheita de água em frascos de vidro de 500 mL, com adição de 0,44 mg/L de acetato de zinco e fixação do pH a 9 com adição de uma solução 1/44M de NaOH, de forma a impedir a oxidação do H₂S entre a colheita e a análise.

5.3. Determinações Analíticas em Laboratório

A determinação de parâmetros físico-químicos (como o CO₂ livre, a alcalinidade e a dureza total), bem como de elementos maiores (catiões e aniões) e do arsénio foi efetuada no laboratório acreditado do INOVA – Instituto de Inovação Tecnológica dos Açores. A listagem de parâmetros analisados, respetivos métodos utilizados, unidades e limites de quantificação pode ser consultada no Quadro 11.4 do Anexo 2.

No caso dos elementos menores e em traço, a determinação foi efetuada pelo *Activation Laboratories Lda* (Canadá) pelo método de ICP-MS, cujas particularidades analíticas podem ser consultadas no *site* do respetivo laboratório (www.actlabs.com). O processo de amostragem envolveu a filtragem de 50 mL de amostra com filtros de 0,45 µm de diâmetro do poro, e posterior acidificação (com HNO₃, ultra-puro).

Relativamente à análise isotópica de oxigénio e deutério, as amostras foram colhidas em frascos de 100 mL de polietileno, sem tratamento. As amostras da primeira campanha de amostragem foram analisadas nos laboratórios CRIE/SIIAF (Centro de Recursos em Isótopos Estáveis/*Stable Isotopes and Instrumental Analysis Facility*, em Lisboa – 27 amostras) e as águas das amostragens seguintes (4 amostras), bem como a água de precipitação recolhida a diferentes altitudes (6 amostras), foram remetidas para o C²TN/IST (Centro de Ciências e Tecnologias Nucleares/Instituto Superior Técnico, Lisboa) para análise por Espectrometria de Massa.

A amostragem das águas de precipitação para determinação de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ foi efetuada no mês de outubro de 2016. Foram utilizados frascos de 1L de polietileno, nos quais foi montado um funil que facilitava a entrada da água no recipiente de recolha. No interior do funil foi colocado um filtro por forma a evitar a entrada de impurezas no frasco (como vegetação ou porções de solo), sendo o mesmo envolvido em papel de alumínio para evitar uma evaporação da água colhida. Os frascos foram devidamente etiquetados e colocados em locais sem vegetação alta (para evitar a entrada de água de escorrência da vegetação; Anexo 2, Fig.11.39 e 11.40).

As determinações em Trítio (^3H) foram efetuadas no laboratório do C²TN/IST, utilizando um espectrómetro de cintilação líquida PACKARD Tri-Carb 2000 CA/LL. A amostragem consistiu na colheita de 500 mL de água, em frasco de polietileno, sem preparação específica.

5.4. Tratamento de Dados

Os dados obtidos para as análises físico-químicas foram sujeitos a análise estatística, com cálculo dos máximos, mínimos, médias, medianas e desvio padrão, por forma a avaliar a variabilidade das diversas nascentes e fumarolas amostradas. Para estes dados foram ainda calculadas matrizes de correlação entre variáveis.

Recorreu-se ao programa *SPSS statistics* (versão 24) para proceder a uma análise fatorial e de componentes dos resultados físico-químicos obtidos, uma vez que este programa permite avaliar o grau de similaridade ou dissimilaridade entre os mesmos, quer a nível das amostras, ou das variáveis introduzidas. Esta ferramenta teve especial importância no agrupamento de nascentes com características semelhantes, sob a forma de um dendrograma.

O programa permite obter ainda, a partir das variáveis introduzidas no mesmo (por exemplo, temperatura, pH, CE, sílica, entre outros) um conjunto de fatores, de número inferior às variáveis, que é responsável pela grande maioria da variabilidade das águas analisadas. Esta ferramenta permite identificar quais os fatores com maior importância na origem de determinada água, contribuindo para a identificação da sua origem. Informações mais detalhadas serão fornecidas no capítulo 6.3 – Análise Multivariada.

6. CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA DA ÁREA DE CONCESSÃO E SUA ENVOLVENTE

6.1. Introdução

A composição da uma água subterrânea é função do seu trajeto, desde que se dá a infiltração, até que surge à superfície ou é captada, e consequência de todos os processos que podem ter influência ao longo deste percurso. Fatores genéricos como o relevo, o clima, a temperatura, a pressão, a composição da precipitação, a composição do solo, a natureza da rocha aquífera e o tempo de residência da água no aquífero contribuem para a variabilidade da composição química da água. Outros fatores, associados às características intrínsecas do próprio local – neste caso a Caldeira do Vulcão das Furnas - têm manifesta importância na composição das águas, nomeadamente os processos de interação água-rocha vulcânica e a presença de um sistema hidrotermal em profundidade, que potenciam a contaminação da água subterrânea por mistura com águas termais, vapor e gases, nomeadamente CO₂ e H₂S, que podem ocorrer em grandes quantidades e levar a uma rápida dissolução e alteração das rochas, especialmente quando aliados a temperaturas elevadas (CARVALHO, 1999).

Na análise hidroquímica são considerados os dados obtidos para 42 pontos de água localizados no interior da “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas” e sua envolvente, distribuídos por 36 nascentes e 6 Fumarolas (cf. Quadro 5.1). Uma vez que várias das águas amostradas não constam dos documentos da concessão serão mencionadas, doravante, pela sua designação ou número de amostra (cf. Quadro 5.1 e Quadro 11.3 do Anexo 2). Os resultados das determinações analíticas de campo e laboratório podem ser consultados no Anexo 3 (Quadro 11.5 a 11.7). Os resultados da análise estatística podem ser consultados no Anexo 4 (Quadro 11.8 a 11.10), bem como as matrizes de correlação entre espécies dissolvidas (Quadro 11.11 e 11.12).

6.2. Composição Físico-Química das Águas Amostradas

6.2.1. Parâmetros Físico-Químicos

As águas estudadas têm temperaturas variáveis entre 14,6°C para a Fonte da Camarça (28), e 96,2°C para a Bica da Água Santa (9). O desvio padrão de 24,82 evidencia esta variância. No caso do pH, os valores vão dos mais ácidos, como é o caso da Água Azeda (2), com pH de 4,8 e a Caldeira da Lagoa das Furnas (39), com um pH de 3,13, às mais básicas, como seja a Caldeira do Esguicho com um pH de 7,95. O pH e a temperatura apresentam uma ligeira correlação linear positiva, com $r = 0,475$ (Anexo 4; Quadros 11.8 a 11.12; Figura 6.1).

Algumas águas são exceções, como é o caso da Caldeira da Lagoa das Furnas (AM-39) e das águas 15, 25 e 28 (Gloria Patri, Três Bicas – Esquerda e Fonte da Camarça). As últimas são águas frias (Figura 6.1 e Anexo 3, Quadro 11.5) com baixa mineralização e CO₂ dissolvido. As amostras 9, 12, 40 e 41 seguem esta tendência mas destacam-se das restantes, apresentando pH básico e temperatura elevada. Trata-se de uma nascente (Bica da Água Santa) e de três fumarolas (Caldeia Grande, do Asmodeu e do Esguicho).

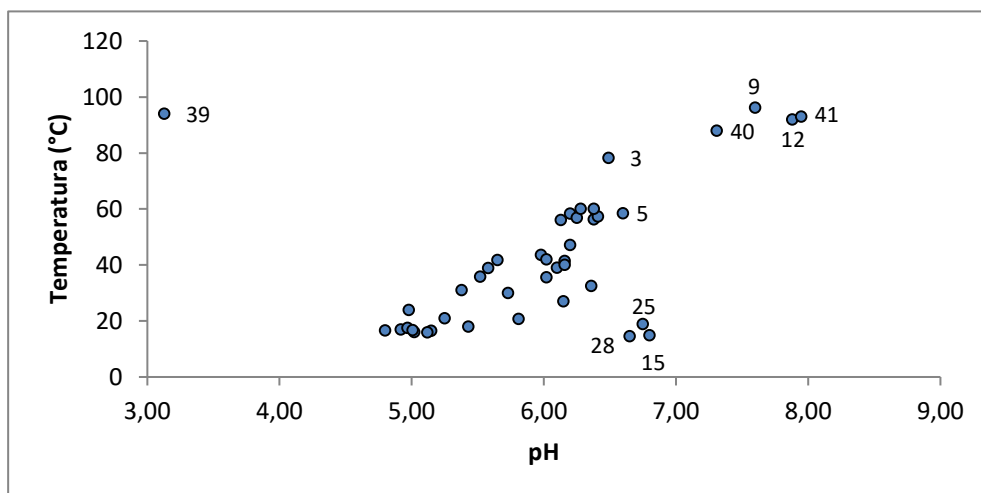


Figura 6.1 – Relação entre o pH e a temperatura (°C) das águas amostradas.

A nível da condutividade elétrica (CE) o valor médio de 894,17 $\mu\text{S}/\text{cm}$ evidencia a existência de valores elevados deste parâmetro e o desvio padrão (603,16 $\mu\text{S}/\text{cm}$) a sua variabilidade, resultado dos diversos fenómenos que contribuem, direta ou indiretamente, para o grau de mineralização das diversas nascentes. O máximo é de 2515 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (AM-40, Caldeira do Asmodeu) e o mínimo 191,20 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (AM-28, Fonte da Camarça). A CE apresenta uma correlação positiva com o pH ($r=0,548$; Anexo 5, Fig.11.41), mas mais elevada com a temperatura ($r=0,676$; figura 6.2).

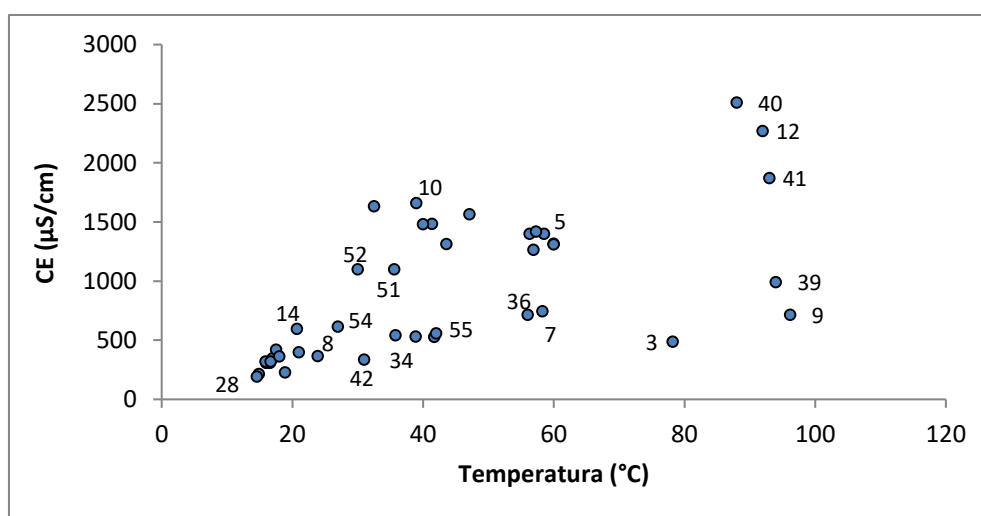


Figura 6.2 – Relação entre a temperatura (°C) e a CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) das águas amostradas.

Verifica-se, para algumas das nascentes, que à medida que a temperatura aumenta, maiores são os valores de CE, sendo isto especialmente aplicável às águas com temperatura inferior a 40°C e CE inferior a 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As restantes nascentes e fumarolas tendem a contrariar esta tendência, nomeadamente as nascentes com temperatura entre 40°C e 80°C, localizadas no Jardim das Termas (incluindo Quenturas – 5), junto aos Banhos Férreos (10) e junto à antiga casa de chá (7 e 36). A Bica da Água Santa (9), a Caldeira da Lagoa das Furnas (39) e as fumarolas da Chã das Caldeiras (12, 40 e 41) contrariam igualmente esta tendência. Verifica-se ainda que as amostras 51 e 52 apresentam CE superior face a outras águas de igual temperatura, o que pode ser considerado expectável visto que se localizam nas imediações da AM-10, a nascente de maior mineralização. O mesmo acontece para a amostra 14 (Dr. José Bruno) que apresenta a maior CE para águas de temperatura $\approx 20^\circ\text{C}$, estando localizada igualmente nas imediações da Água Férrea ou BCP I (cf. Figura 4.4).

Os valores obtidos para o Eh são bastante dispersos, variando entre -253 mV e 304 mV, para a Caldeira Grande (AM-12) e para a Caldeira da Lagoa das Furnas (AM-39), respetivamente.

Os valores de CO₂ livre apresentam um máximo de 1335,40 mg/L e mínimo de 3,8 mg/L, associados a um desvio padrão de 373,17 mg/L. Tal variabilidade e concentração é expectável dada a existência de nascentes com importante componente gasocarbónica na região das Furnas (CRUZ *et al.*, 1999; CRUZ & FRANÇA, 2006; FREIRE, 2006; GEO.AZ, 2016, entre outros). Este parâmetro apresenta correlação negativa com o pH ($r=-0,651$; Anexo 5, Fig.11.42), embora fosse expectável um $r=-1$, dada a proximidade entre os parâmetros. De acordo com CARVALHO (1999), esta diferença de correlação pode indicar uma introdução do CO₂ nas águas próximo da sua exsurgência, não decorrendo tempo suficiente para que ocorra hidrólise das rochas, ou a presença de um excesso de CO₂ que, mesmo com a ocorrência de fenómenos de hidrólise, não permite uma subida do pH. A correlação com a temperatura também é negativa e elevada ($r=-0,608$) indicando que o aumento de temperatura tende a ser acompanhado pela descida do CO₂ livre nas águas (Figura 6.3). O CO₂ livre também apresenta uma correlação negativa com a CE, mas baixa ($r=-0,366$; Anexo 5, Fig.11.43).

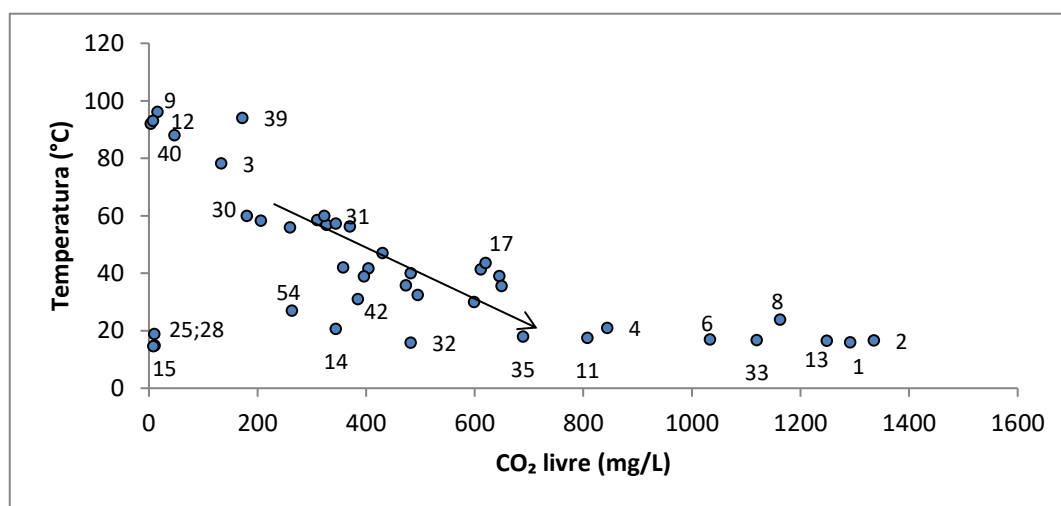


Figura 6.3 – Relação entre o CO₂ livre (mg/L) e a temperatura (°C) das águas amostradas.

Verifica-se que as águas termais (isto é, águas que exsurgem com temperatura 4°C superior à temperatura média do ar de 18°C, segundo Schoeller, 1962) evoluem segundo a tendência mencionada, existindo um grupo de águas de $T^{\circ} \approx 60^{\circ}\text{C}$ com valores de CO₂ livre inferiores a 400 mg/L, enquanto as águas termais de temperatura inferior atingem valores de CO₂ livre próximos de 700 mg/L. A água termal que mais contraria esta tendência é a AM-54 (Cabaço II). As águas termais de temperatura mais elevada (e.g. 9, 12, 40) sobressaem pelo facto de apresentarem os valores mais baixos de CO₂ livre. As águas frias, por sua vez, dispersam-se ao longo do gráfico, destacando-se as águas 15 (Gloria Patri), 25 (Três Bicas – Esquerda) e 28 (Fonte da Camarça) pelos baixos valores de CO₂ livre que apresentam. Correspondem às águas frias com pH mais elevado ($6,65 < \text{pH} < 6,80$), conforme seria expectável.

Relativamente ao CO₂ total calculado a partir dos dados obtidos, é de notar a elevada presença deste gás na região em estudo e, em função disso, os diferentes tipos de águas, uma vez que algumas possuem pouco CO₂ dissolvido (mínimo de 73,5 mg/L; Fonte da Camarça) e outras apresentam valores bastante elevados (máximo de 1423,5 mg/L; Água Azeda). O desvio padrão é de 398,44 mg/L, indicando esta variação.

Conforme mencionado no capítulo 3, a presença de um sistema hidrotermal em profundidade no Vulcão das Furnas é responsável pela ocorrência de emanções gasosas na freguesia e junto à Lagoa das Furnas, as quais tendem a ocorrer segundo uma anomalia de CO₂ de direção geral E-O que atravessa a caldeira. Estes fluidos hidrotermais contaminam os aquíferos pouco profundos, conferindo às águas temperatura e uma importante componente gasocarbónica, em concentrações diversas. Esta anomalia é detetada tanto em solos como em águas superficiais, permitindo concluir, numa primeira aproximação, que águas com maior concentração em CO₂ devem surgir em locais de maior concentração de CO₂ no solo. A distribuição dos valores de CO₂ total obtidos para as nascentes e fumarolas amostradas pode ser consultada nas Figuras 11.45 e 11.46 do Anexo 5. Com base em dados de VIVEIROS, *et al.* (2010) foi possível elaborar um mapa que conjuga os valores de fluxo de CO₂ no solo (g m⁻² d⁻¹) obtidos por estes autores, com os valores de CO₂ total de maior expressão obtidos para as águas analisadas (Figura 6.4).

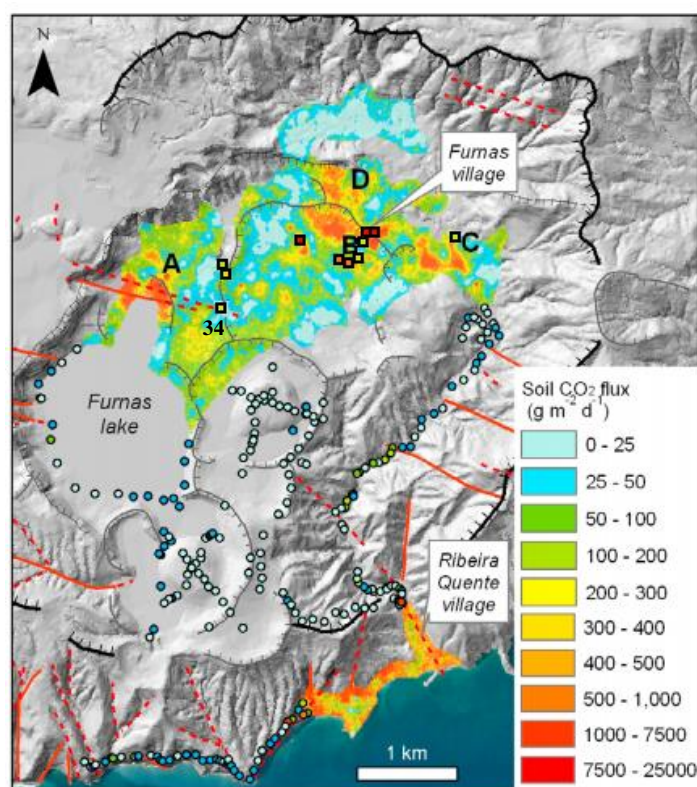


Figura 6.4 – Distribuição do fluxo de CO₂ no solo do Vulcão das Furnas (VIVEIROS *et al.*, 2010) com implementação dos valores de CO₂ total obtidos para as águas amostradas (quadrados junto às zonas A, B, C e D).

Analisando a figura em apreço é possível concluir que os valores mais elevados de CO₂ total (e.g. superior a 1000 mg/L) calculado para as amostras (cf. quadrados a vermelho e laranja) se localizam nas zonas de maior desgaseificação de CO₂ de solo (superior a 300 g m⁻² d⁻¹). As nascentes assinaladas a amarelo (CO₂ total entre 400 e 1000 mg/L) também se encontram em zonas de importante desgaseificação, chamando-se a atenção para a nascente 34 (Sanguinhal; Figura 6.4), cujo valor de CO₂ total parece associado a uma origem tectónica, dada a sua localização no alinhamento de falhas que atravessa a Lagoa das Furnas. As nascentes localizadas a Norte desta, nomeadamente na zona da Poça da Dona Beija, também parecem ser afetadas por um controlo tectónico, possivelmente pela sua localização no bordo da estrutura assinalada na Figura 6.4.

Os valores de alcalinidade variam entre um máximo de 871 mg/L (Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação I) e mínimo de 74 mg/L (Fonte da Camarça) para as nascentes, tendo a fumarola da Caldeira da Lagoa das Furnas o valor mais baixo obtido (3 mg/L), contribuindo para um desvio padrão de 260,04 mg/L. A alcalinidade possui uma correlação positiva elevada com a condutividade elétrica ($r=0,836$) e com a mineralização ($r=0,911$), bem como com alguns cátions resultantes de reacções de hidrólise de silicatos, como é o caso do sódio ($r=0,766$), potássio ($r=0,780$), cálcio ($r=0,741$) e magnésio ($r=0,711$). O coeficiente de correlação com a sílica, no entanto, é de apenas $r=0,500$. O gráfico de relação entre a alcalinidade e a CE (Anexo 5, Fig.11.44) mostra uma divisão nítida das amostras analisadas, verificando-se que há um agrupamento de nascentes com alcalinidade inferior a 272 mg/L e um grupo de nascentes com alcalinidade superior a 498 mg/L. Este último grupo é constituído por águas localizadas na zona do Jardim das Termas e dos Banhos Férreos, que se têm vindo a destacar, bem como pela Caldeira Grande, do Asmodeu e do Esguicho (12, 40 e 41). A fumarola da Caldeira da Lagoa das Furnas é a que mais se afasta desta tendência por apresentar o menor valor de alcalinidade.

6.2.2. Elementos Maiores – Cátions

CARVALHO (1999) refere que na dissolução de rochas vulcânicas tende a haver uma maior contribuição de substâncias catiónicas dissolvidas face aos aniões, tendo estes origem exterior. A contribuição em cátions está, assim, dependente da composição da própria rocha, do solo, da disponibilidade de CO_2 , das trocas iónicas internas da rocha e do grau de solubilidade em função das concentrações e do valor de pH.

O catião em maior concentração é o sódio, com uma média de 157,52 mg/L, um máximo de 580 mg/L (Caldeira Grande e Caldeira do Asmodeu) e um mínimo de 26 mg/L (Gloria Patri). O sódio tem um coeficiente de correlação positivo e bastante elevado com a CE ($r=0,971$; Figura 6.5), o que põe em evidência a sua importância nas águas analisadas, dado que representa um produto da dissolução dos aluminossilicatos de Na.

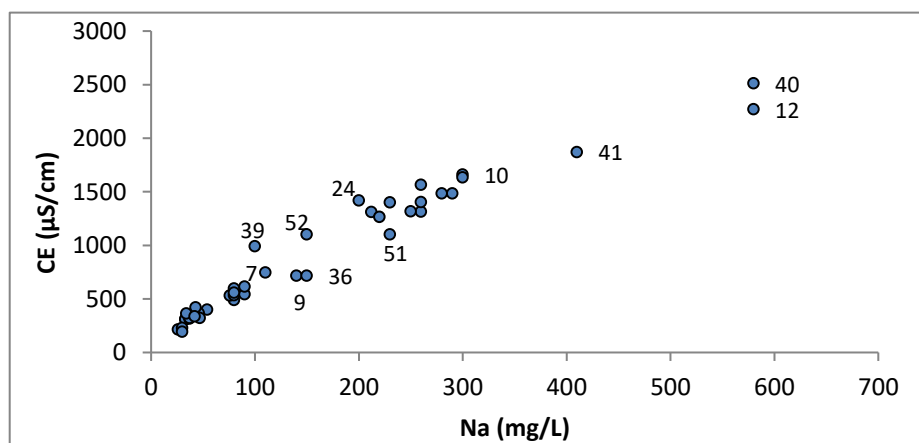


Figura 6.5 – Evolução do sódio relativamente à CE das amostras analisadas.

Verifica-se que as maiores concentrações de Na são obtidas para fumarolas, estando a Caldeira Grande (12) e do Asmodeu (40) distanciadas das restantes águas analisadas. Em geral, verifica-se que águas mais frias tendem a apresentar valores mais baixos de Na (Anexo 5, Fig.11.47) e que à medida que a temperatura sobe, a concentração neste catião tende a aumentar. A exceção é representada pelo grupo de águas localizadas no Jardim das Termas e junto aos Banhos Férreos, que parecem evoluir no sentido contrário, i.e., mostram arrefecimento com a interação água-rocha.

Em concentração segue-se o ião potássio, com valor máximo de 45 mg/L (Três Bicas - Centro) e o mínimo a registrar-se na Fonte da Camarça (10,5 mg/L). O valor médio (25,58 mg/L) é bastante inferior ao registrado para o ião Na e a sua relação transcreve-se num coeficiente de correlação positivo, mas baixo ($r=0,488$; Figura 6.6). Sendo o ião K um produto da lixiviação das rochas, tende a acompanhar o Na e a apresentar coeficiente de correlação positivo e elevado com o mesmo, o que não se verifica, provavelmente pela facilidade com que o ião K fica retido em minerais de neoformação. Analisando a figura é possível observar a tendência positiva, que provavelmente não atinge coeficiente mais elevado devido às fumarolas (12, 40 e 41) que apresentam valores de sódio superiores aos das restantes amostras, embora tal não se verifique para o potássio onde os seus valores rondam os 20-25 mg/L. À semelhança do verificado para o sódio, é nas águas termais que tendem a surgir os valores mais elevados de K, especialmente nas amostras localizadas no Jardim das Termas, na zona dos Banhos Férreos e junto à Chã das Caldeiras (p.e. AM-07).

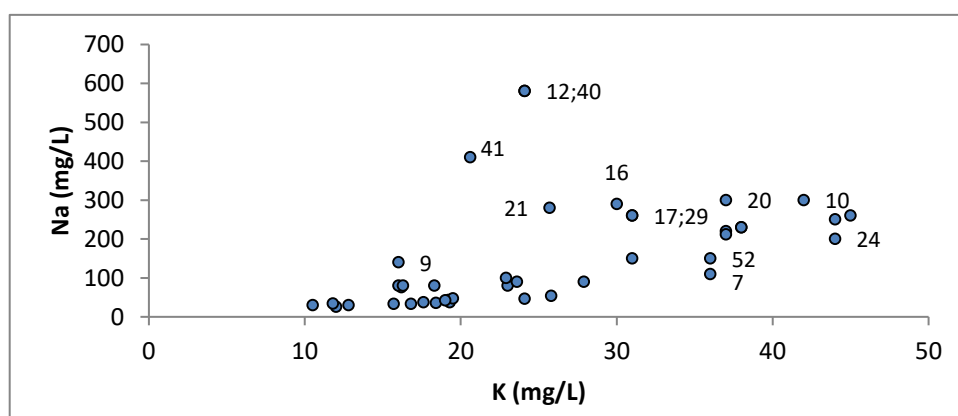


Figura 6.6 – Relação entre os principais catiões presentes nas águas analisadas.

Os iões cálcio e magnésio surgem em menores concentrações, com médias de 17,74 mg/L e 8,52 mg/L respetivamente, sendo que em algumas águas o magnésio apresenta valores superiores aos do cálcio, como é o caso da Caldeira do Asmodeu (40) e da Água da Camarça (28). Apresentam uma relação positiva elevada entre si ($r=0,889$; Figura 6.7), o que indica que tendem a surgir juntos.

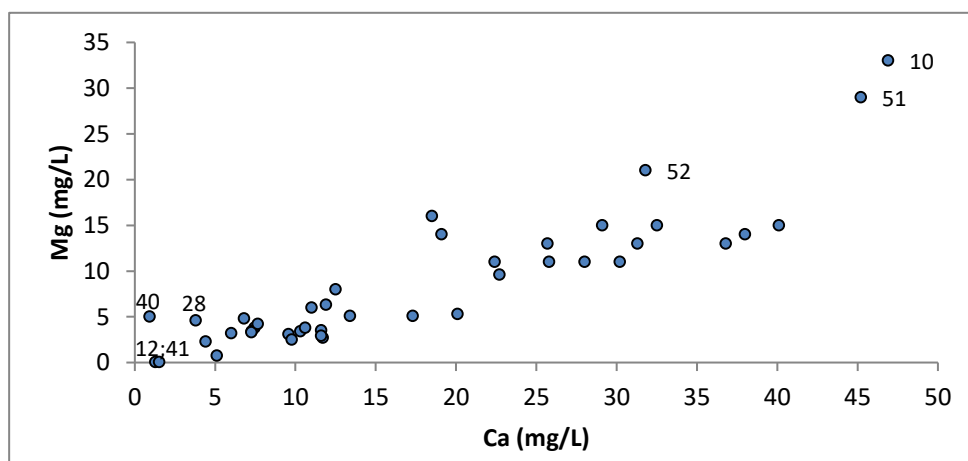


Figura 6.7 – Relação entre os principais catiões presentes nas águas analisadas.

Têm correlação relativamente elevada com o potássio ($r=0,729$ para Ca/K e $r=0,611$ para Mg/K), mas baixa com o Na, o catião de maior expressão ($r=0,259$ para Ca/Na e $r=0,251$, para Mg/Na; Anexo 5, Fig.11.48 e 11.49). Com a alcalinidade apresentam também boa relação ($r=0,741$ para Ca e $r=0,711$ para Mg, respetivamente).

O ferro total analisado nas águas tem um valor médio de 3,95 mg/L e apresenta grande variabilidade. Tem uma concentração importante em algumas nascentes, nomeadamente na Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação I (17 mg/L), Poça da Dona Beija ou Terra Nostra II (11 mg/L) e Ribeira de Nossa Senhora ou Terra Nostra I (10 mg/L). As correlações entre o ferro total e os restantes iões e parâmetros são muito baixas a quase nulas, salientando-se apenas a correlação com o magnésio ($r=0,484$; Anexo 5, Fig.11.50).

Para o ião amónio, salienta-se apenas o facto da Caldeira da Lagoa das Furnas apresentar 6 mg/L de NH_4^+ , ao passo que as restantes fumarolas e nascentes têm valores inferiores a 0,5 mg/L.

6.2.3. Elementos Maiores – Aniões

O anião dominante nas amostras em causa é o bicarbonato, proveniente da dissolução de CO_2 . Apresenta um valor médio de 399,54 mg/L, atingindo um máximo de 1063 mg/L e um mínimo de 4 mg/L. Este último valor, obtido na Caldeira da Lagoa das Furnas (39) distancia-se dos restantes, onde o mínimo é de 90 mg/L na Fonte da Camarça. Verifica-se que as águas de maior temperatura tendem a apresentar teores mais elevados de bicarbonato (em geral superiores a 200 mg/L; Figura 6.8), sendo uma exceção a nascente Dr. José Bruno (AM-14), com 332 mg/L e temperatura de 20,7°C, ou a nascente da Encosta – Esquerda (AM-31), que com temperatura da ordem dos 60°C tem apenas 96,3 mg/L de bicarbonato (Figura 6.8). Os coeficientes de correlação mais elevados (embora baixos) que este ião apresenta são com o cloreto ($r=0,497$) e o sódio ($r=0,464$).

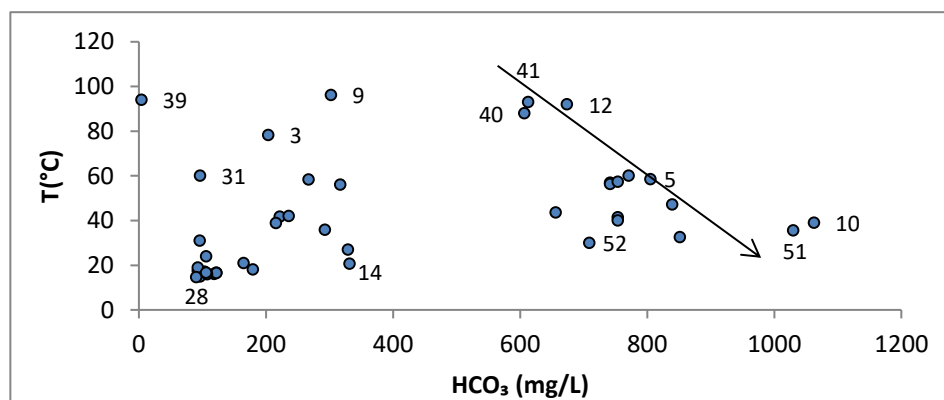


Figura 6.8 – Evolução do bicarbonato relativamente à temperatura das águas analisadas.

À semelhança do que sucedia para alguns catiões e parâmetros, existe um grupo de nascentes que parece contrariar a tendência de evolução do HCO_3^- com a temperatura (seta), às quais pertencem as águas localizadas no Jardim das Termas e na zona dos Banhos Férreos, bem como as amostras da Caldeira Grande (12), do Asmodeu (40) e do Esguicho (41).

A presença do ião cloreto nas águas subterrâneas está associada à água de precipitação e à dissolução de rochas aquíferas, bem como aos fenómenos de interação água-rocha e ao tempo de residência da água no aquífero, podendo a contaminação externa aumentar a concentração deste ião. Verifica-se que 19 das amostras analisadas contêm teores em cloreto iguais ou superiores a 50 mg/L, sendo que os três valores mais elevados (178, 243 e 270 mg/L) pertencem a fumarolas (Caldeira do Esguicho, do Asmodeu e Grande, respetivamente; Figura 6.9).

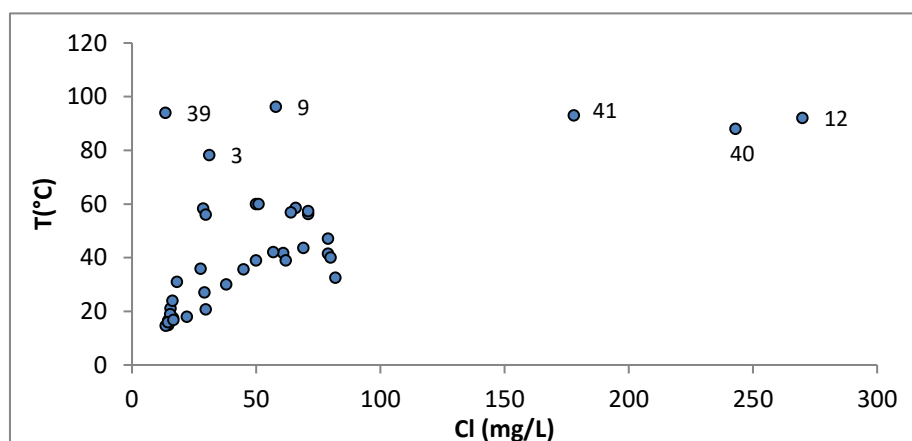


Figura 6.9 – Evolução do cloreto relativamente à temperatura das águas analisadas.

Os valores mais baixos são encontrados, em geral, nas águas de menor temperatura, com exceção da Caldeira da Lagoa das Furnas (39), que apresenta uma temperatura de 94°C e o valor mais baixo de cloretos (13,5 mg/L; Figura 6.9). O cloreto apresenta relações positivas e relativamente elevadas com vários parâmetros e sais, como a CE ($r=0,834$), o pH ($r=0,655$), a temperatura ($r=0,648$), o sódio ($r=0,915$), o bicarbonato ($r=0,777$) e o fluoreto ($r=0,896$). Da relação com a CE (Anexo 5, Fig.11.51) salienta-se o facto de existir um grupo de nascentes, todas - com exceção da amostra 9 - situadas na zona da Ribeira de Nossa Senhora (AM-26, 27 e 55), que apresentam valor em cloreto elevado relativamente ao seu valor de CE.

A concentração de sulfato nas águas é muito variável, estando representada por um valor máximo de 490 mg/L (Caldeira do Asmodeu) e um mínimo de 4,4 mg/L (Fonte da Camarça e Água do Vale de Alcântara). O segundo valor mais elevado (470 mg/L) corresponde à água da fumarola da Caldeira da Lagoa das Furnas (39). As águas frias com alguma componente gasocarbónica tendem a apresentar valores de sulfato mais elevados (Anexo 5, Fig.11.52), como é o caso da Água da Prata (AM-08 com 65 mg/L), do Chalet Frio – Banhos (AM-06) e do Chalet Frio (AM-11), tendo a última a mesma concentração em sulfato que a Caldeira Grande (AM-12; 58 mg/L). Estes valores podem estar relacionados com a libertação de H_2S gasoso de origem profunda que contamina as águas que lhe estão sobrejacentes, ou com a ebulição de águas em profundidade cujo vapor ascende e é introduzido nas águas mais superficiais, contaminando-as. Dado o enquadramento da região em estudo ambas as possibilidades são plausíveis e explicam os valores elevados encontrados em algumas águas provenientes de fumarolas, bem como em águas frias que se encontram junto a campos fumarólicos. No entanto, salienta-se o facto de as fumarolas geograficamente próximas apresentarem valores díspares de sulfato, como é o caso da Caldeira do Asmodeu (490 mg/L) e do Esguicho (75 mg/L), aproximando-se a Caldeira do Asmodeu do valor obtido para a Caldeira da Lagoa das Furnas, e não do valor obtido para as restantes fumarolas amostradas na Chã das Caldeiras (Anexo 5, Fig.11.52).

A contaminação por via agrícola é igualmente uma possibilidade para a contribuição de sulfato nas águas, por esta ser uma atividade usual da região das Furnas.

O ião sulfato não apresenta boas correlações com outras espécies, e o melhor coeficiente é obtido com a temperatura ($r=0,470$), sendo no entanto baixo.

A maioria das nascentes analisadas apresenta concentrações de nitrato abaixo do limite de quantificação (0,3 mg/L). Apenas cinco têm concentrações superiores, com a Gloria Patri, Três Bicas – Esquerda, Fonte da Camarça e Poço entre 5,3 mg/L e 6,2 mg/L e a nascente da Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos V a distanciar-se das restantes, com 24,1 mg/L. Estes valores, em especial o último, podem apontar para uma contaminação de origem agrícola. Sabe-se no

entanto que o NH_3 de origem profunda pode contribuir para o aparecimento deste composto orgânico de azoto.

As águas amostradas apresentam concentração em fluoreto com um mínimo de 0,5 mg/L, existindo três amostras com valores superiores a 10 mg/L, obtidas para três fumarolas distintas: Caldeira do Esguicho (16 mg/L), Caldeira do Asmodeu (12 mg/L) e Caldeira Grande (12 mg/L). Este ião apresenta coeficientes de correlação positivos e moderadamente altos com vários parâmetros e espécies, nomeadamente temperatura ($r=0,677$), pH ($r=0,658$), CE ($r=0,752$) e mineralização total ($r=0,665$) e em especial com o sódio ($r=0,834$), o bicarbonato ($r=0,813$) e o cloreto ($r=0,896$).

6.2.4. Sílica (SiO_2)

Segundo CUSTODIO (1978), para águas de terrenos vulcânicos é frequente que as concentrações de sílica se encontrem entre 10-40 mg/L, podendo, para águas pouco profundas, atingir valores inferiores a 10 mg/L e, para águas termais, valores superiores a 100 mg/L. As concentrações de SiO_2 obtidas são em geral elevadas, com média de 135,86 mg/L e máximo de 255 mg/L (Três Bicas - Centro). O valor mais baixo registado nas nascentes e fumarolas das Furnas é de 55,6 mg/L de SiO_2 (Gloria Patri).

Os valores obtidos são elevados face aos propostos por CUSTODIO (1978), mas podem ser atribuídos à presença de rochas ácidas de natureza ácida e águas termais, cuja temperatura favorece as reações de hidrólise, bem como à forte componente gasocarbónica associada tanto a águas termais como frias, que favorece o processo de lixiviação (CARVALHO, 1999).

Da análise da figura 6.10 nota-se que, para as águas das Furnas, a relação entre os valores de SiO_2 e temperatura é relativamente linear, o que se traduz num aumento das concentrações em sílica à medida que a temperatura das águas aumenta. As águas termais tendem, de facto, a apresentar valores superiores a 100 mg/L de SiO_2 e as águas frias valores de SiO_2 mais baixos. As nascentes termais da Poça da Dona Beija (27), Caldeira dos Vimes (42) e Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos IV (51) estão no limiar desta divisão. Embora esta relação com a temperatura indiciasse que seria possível utilizar geotermómetros de sílica para calcular a temperatura do aquífero, a elevada componente gasocarbónica de algumas águas, que promove acidificação e dissolução da rocha, impossibilita a aplicação deste método.

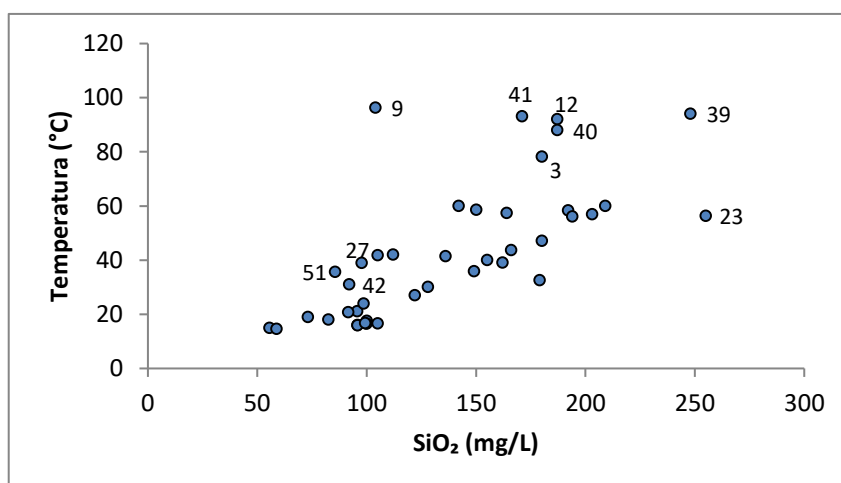


Figura 6.10 – Relação entre a concentração em sílica e a temperatura das águas amostradas.

Verifica-se, no entanto, que algumas das águas analisadas se destacam (e.g. águas com $T > 80^\circ\text{C}$). Alguns fatores que podem afetar esta relação são a presença de CO_2 de origem vulcânica (e consequente redução do pH) e a presença de processos de mistura. No caso específico das fumarolas

12, 39, 40 e 41, a sua divisão pode estar principalmente associada ao pH, uma vez possuem temperatura elevada associada a um pH também elevado (superior a 7) e a amostra 39 apresenta temperatura elevada mas pH baixo (pH=3,13). A amostra 9, apesar de apresentar uma temperatura e pH semelhante às primeiras fumarolas, representa uma nascente, pelo que é menos mineralizada que estas e possui menos SiO₂.

O coeficiente de correlação entre a sílica e o pH é de $r=0,157$ e de $r=-0,053$ entre a sílica e o CO₂ Total (Anexo 5; Fig.11.53 e 11.54).

Não se verifica correlação linear entre a sílica e o bicarbonato ($r=0,054$), sendo no entanto notória a presença de dois grupos distintos de águas (Figura 6.11).

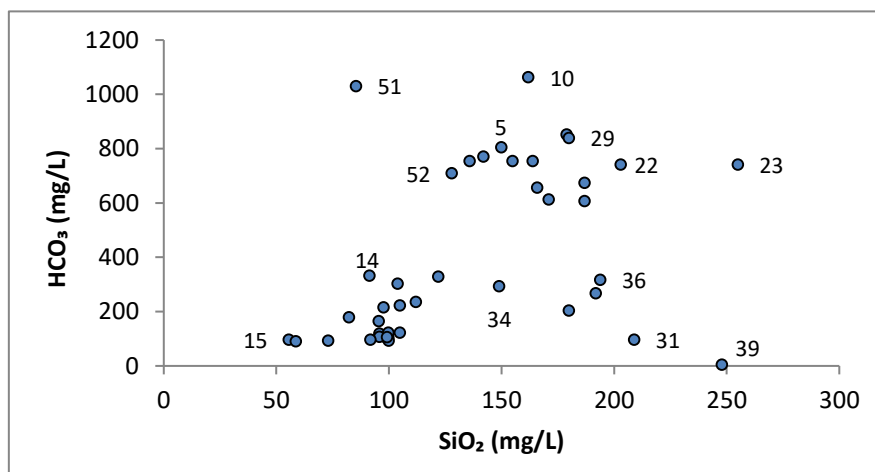


Figura 6.11 – Relação entre SiO₂ e HCO₃ para as águas amostradas.

Existe um grupo de águas com bicarbonato superior a ≈ 600 mg/L e valores de SiO₂ entre 100 e 200 mg/L, aproximadamente. São águas de mineralização superior a 1100 mg/L, e que se dispersam pelas zonas do Jardim das Termas (e.g. 5, 22 e 29) e dos Banhos Férreos (e.g. 10, 51 e 52). A amostra 23 (Três Bicas - Centro), localizada no Jardim das Termas, apresenta valor de sílica equiparável apenas ao obtido para a fumarola da Caldeira da Lagoa das Furnas, e que se distingue das restantes amostras das zonas anteriores, incluindo da nascente Três Bicas - Direita, bastante semelhante à AM-23, e com apenas 164 mg/L de SiO₂.

As restantes águas apresentam valor de HCO₃ inferior a 332 mg/L (AM-14), mas valores de sílica dispersos (entre 50 e 250 mg/L) com predominância de um grupo de nascentes projetado no gráfico junto aos 100 mg/L. São nascentes termais e frias, sem dispersão geográfica específica, uma vez que se localizam em diversos locais distintos da Caldeira do Vulcão das Furnas, mas que apresentam valores de mineralização geralmente inferiores a 800 mg/L. As nascentes deste grupo com valores de sílica entre 150 mg/L e 250 mg/L são exclusivamente termais (e.g. 31, 34, 36 e 39).

6.2.5. Sulfureto de Hidrogénio (H₂S)

As formas reduzidas de enxofre estão representadas sob a forma de sulfureto de hidrogénio, obtendo-se valores variáveis entre 13 mg/L e 0,5 mg/L de H₂S. Os valores mais elevados são obtidos para as fumarolas da Caldeira da Lagoa das Furnas (13 mg/L), Caldeira Grande (8,7 mg/L) e Caldeira do Esguicho (5,2 mg/L), registando-se alguns valores significativos (superiores a 1 mg/L) em águas localizadas na Chã das Caldeiras, junto ao polo fumarólico. A única amostra analisada que apresenta valores de H₂S desta ordem e não se localiza na chã das caldeiras é a nascente da Morangueira, localizada na zona do Jardim das Termas (com 1,8 mg/L de H₂S).

6.2.6. Elementos Menores e em Traço

Segundo FREIRE (2006), o Al, As, Li, Mn, Pb, Sr e Zn são os elementos com mais interesse do ponto de vista vulcânico, enquanto CARVALHO (1999) afirma que o arsénio, o cézio e o lítio têm possível origem vulcânica e elevadas concentrações destes elementos e do rubídio em águas de temperatura elevada podem evidenciar contribuição de fluido magmático.

Assim, deu-se especial atenção às análises elementares de alumínio (Al), arsénio (As), bário (Ba), cézio (Cs), crómio (Cr), cobre (Cu), lítio (Li), manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb), rubídio (Rb), estrôncio (Sr) e zinco (Zn).

No caso do alumínio (Al), os valores obtidos são bastante variados, o que se traduz num valor máximo de 1190 µg/L, mínimo de 6 µg/L e desvio padrão de 411,52 µg/L. Os valores mais elevados tendem a surgir em águas frias de elevada componente gasocarbónica localizadas na Chã das Caldeiras, junto ao polo fumarólico (superiores a 654 µg/L).

As maiores concentrações de arsénio (As) são obtidas nas amostras colhidas em fumarolas, nomeadamente 1590 µg/L na Caldeira Grande, 1170 µg/L na Caldeira do Asmodeu e 563 µg/L na Caldeira do Esguicho. A Bica da Água Santa apresenta um valor significativo deste elemento (156 µg/L) quando comparado com os das restantes amostras (inferiores a 64 µg/L), o que pode sugerir alguma ligação com o campo fumarólico. Nas restantes águas amostradas os valores mais elevados tendem a surgir numa fumarola (Caldeirão do Chalet) e em águas termais dispersas (Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos I, Poça da Dona Beija e Ribeira de Nossa Senhora), incluindo as nascentes termais do Jardim das Termas. As nascentes das Três Bicas – Centro e Três Bicas – Direita apresentam valores de arsénio muito díspares (18 µg/L e 3 µg/L, respetivamente), mas, dada a sua localização e proximidade, é provável que o valor mais baixo resulte de um erro analítico.

Em relação ao elemento bário (Ba), as nascentes Poça da Dona Beija e Ribeira de Nossa Senhora ou possuem as concentrações mais elevadas (5,3 e 5,1 µg/L, respetivamente), sendo o valor mediano das águas analisadas de 1,90 µg/L.

A concentração em cézio (Cs) apenas tem significado em duas fumarolas, nomeadamente a Caldeira Grande com 11,9 µg/L e o Caldeirão do Chalet com 4,8 µg/L de Cs.

As concentrações de crómio (Cr) estão abaixo do limite de deteção na maioria das águas, tendo sido analisados valores ao redor de 5 µg/L em 13 nascentes, na sua maioria termais, excluindo as fumarolas.

As concentrações de cobre (Cu) nas águas estão abaixo do limite de deteção do método analítico, registando-se apenas a nascente das Quenturas que apresenta um valor mais elevado (7,9 µg/L) comparativamente com as restantes nascentes (inferior a 2,2 µg/L). No entanto, trata-se de um valor vestigial.

O lítio (Li) está dissolvido nas águas em concentrações que variam entre 2 µg/L (Gloria Patri) e 307 µg/L (Caldeira Grande), estando os valores mais elevados associados a águas termais (superiores a 34 µg/L).

O manganês (Mn) surge nas águas analisadas em concentrações apreciáveis, apresentando uma média de 566,57 µg/L, com um máximo de 1480 µg/L e um mínimo de 1,70 µg/L. As águas frias com baixa componente gasocarbónica (AM-15, AM-25 e AM-28) apresentam as concentrações mais baixas deste elemento (inferiores a 10 µg/L). A título de curiosidade, e porque a concentração de

manganês foi analisada nas amostras colhidas na Lagoa das Furnas, menciona-se os valores díspares obtidos para as mesmas (210 µg/L para a Lagoa das Furnas 1, e 6,6 µg/L para a Lagoa das Furnas 2), o que estará relacionado com o facto da amostra LF 1 ter sido colhida na margem NO da Lagoa, junto ao polo fumarólico aí existente, e a amostra LF 2 na margem SE, longe de qualquer influência fumarólica.

As concentrações em níquel (Ni) mais elevadas foram de 6,2 µg/L para a nascente Encosta – Direita e 3,8 µg/L para as nascentes Chalet Frio e Água da Prata. O valor médio é de 2,10 µg/L.

As águas Grutinha II (3,75 µg/L) e Água Azeda do Rebentão (3,14 µg/L) possuem concentrações em chumbo (Pb) superiores às restantes águas, embora estejam localizadas em zonas afastadas e apresentem características físico-químicas diferentes.

O rubídio (Rb) surge em concentrações apreciáveis nas amostras analisadas, com um valor médio de 82,78 µg/L, máximo de 206 µg/L (Caldeira Grande) e mínimo de 16,2 µg/L (Fonte da Camarça). As nascentes termais apresentam as maiores concentrações de Rb (entre 206 e 80,1 µg/L), com exceção das nascentes termais Ribeira de Nossa Senhora (47,7 µg/L) e Poça da Dona Beija (42,6 µg/L). À semelhança do sucedido em outros elementos, os valores mais baixos (inferiores a 20 µg/L) correspondem a águas frias lisas.

A concentração em estrôncio (Sr) das amostras analisadas varia entre 103 µg/L e 10,10 µg/L, registados no Poço e Três Bicas – Esquerda, respetivamente. As águas termais surgem com concentrações de Sr em geral superiores a 40 µg/L, com exceção da Caldeira Grande (25,6 µg/L), do Caldeirão do Chalet (24,10 µg/L) e da Bica Água Santa (12,5 µg/L).

O zinco (Zn) aparece dissolvido em concentrações que variam entre 66,40 µg/L e 3,50 µg/L, sendo o valor médio de 15,22 µg/L. Não parece existir relação vincada com a temperatura, nem com a localização geográfica das nascentes.

6.2.7. Fácies Hidrogeoquímica

A fácies hidrogeoquímica de uma água é uma medida de classificação da mesma, com base nas principais espécies que nela se encontram dissolvidas.

À semelhança do apontado por CRUZ, *et al* (1999), verifica-se que os componentes principais das águas analisadas seguem uma relação $\text{Na} \gg \text{K} > \text{Ca} > \text{Mg}$, e $\text{HCO}_3 \gg \text{Cl} > \text{SO}_4$, sendo a sílica também uma espécie em concentração significativa nestas águas. Conforme foi mencionado anteriormente, as águas da região das Furnas apresentam grande variabilidade composicional, também refletida no grau de mineralização, com valores de mineralização total que vão desde os 228,28 mg/L para águas frias com baixa componente gasocarbónica (Água da Camarça) e 2149 mg/L nas águas colhidas em fumarolas (Caldeira do Asmodeu), com exceção da Caldeira da Lagoa das Furnas que representa o condensado de uma fumarola e tem mineralização total de 879 mg/L. O gráfico de DUROV (Figura 6.12) permite representar as amostras de acordo com a sua composição química (catiões e aniões), pH e mineralização (na forma de total de sólidos dissolvidos).

Analisando a Figura 6.12 verifica-se que a grande maioria das amostras analisadas está concentrada no campo das águas bicarbonatadas sódicas (Na-HCO_3), com um total de 36 águas assim classificadas. As restantes seis águas apresentam fácies bicarbonatada-sulfatada sódica ($\text{Na-HCO}_3\text{-SO}_4$: Água da Prata, Chalet Frio e Caldeira do Asmodeu), bicarbonatada-cloretada sódica ($\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$: Encosta – Esquerda) e bicarbonatada sódico-cálcica (Na-Ca-HCO_3 : Água do Vale de Alcântara), existindo apenas uma amostra que mais se distancia desta classificação, sendo sulfatada sódica (Na-

SO₄: Caldeira da Lagoa das Furnas). O gráfico de DUROV evidencia ainda a grande variabilidade ao nível dos valores de pH obtidos entre as várias amostras, bem como a nível da mineralização.

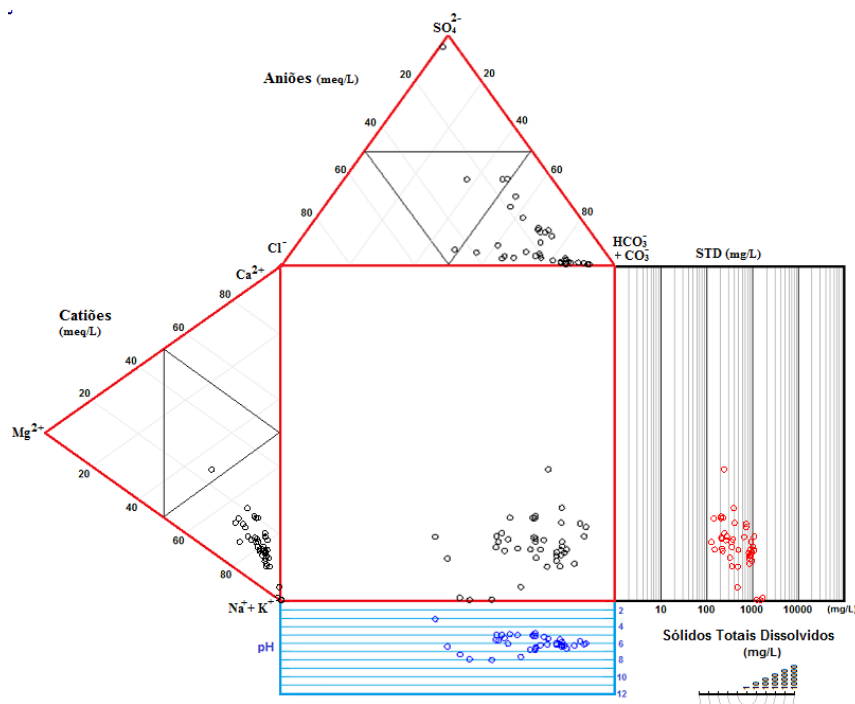


Figura 6.12 – Diagrama de DUROV com projeção das 42 águas analisadas (elaborado no QUALIGRAF).

6.3. Análise Multivariada

Os métodos estatísticos utilizados na análise de variáveis estão divididos em dois grupos distintos: um grupo que trata as variáveis de maneira isolada – estatística univariada – e um grupo que avalia as variáveis como um conjunto – estatística multivariada. De forma sucinta, a análise estatística multivariada corresponde a um grande número de métodos e técnicas que utilizam, de forma simultânea, todas as variáveis para realizar a interpretação de um conjunto de dados em estudo (NETO, 2004 *in* VICINI, 2005).

A análise estatística multivariada permite, de forma geral, reduzir o número de dados e promover a sua simplificação estrutural, ordenar e agrupar objetos de estudo similares, investigar a independência entre variáveis, prever valores de determinadas variáveis com base na interação entre outras variáveis, aplicar testes de hipóteses, entre outros, dependendo dos métodos escolhidos. Quando se pretende analisar de que forma um conjunto de dados se relaciona entre si, ou seja, qual o seu grau de similaridade, com base nas variáveis consideradas, são indicados dois métodos: o método de análise fatorial (AF) com análise de componentes principais (ACP) e o método de análise hierárquica ou de *clusters* (AC) (VICINI, 2004; GOMES, 2013).

A análise fatorial (AF) com análise de componentes principais (ACP) está diretamente relacionada com as variáveis, designando-se por análise modo-R, enquanto a análise de agrupamento ou *clusters* (AC) está relacionada com os indivíduos ou casos, sendo designada por análise modo-Q.

6.3.1. Análise de Modo-R

A análise de modo-R permite identificar as variáveis que mais contribuem para a explicação da variabilidade dos dados em estudo, com perda mínima de informação. O objetivo principal da sua aplicação é a simplificação da informação, utilizando técnicas que permitem expressar as relações

entre um conjunto de variáveis através de um menor número de características comuns entre elas, designadas por fatores. Para analisar a aplicabilidade deste método aos dados em estudo devem ser consultados os valores do teste de KMO, considerando-se que o método tem boa adequabilidade quando o valor é superior a 0,5. Os valores das comunalidades indicam quantidades de variância, ou seja, representam as correlações de cada variável explicada por cada um dos fatores. O valor mínimo aceitável de comunalidade para as variáveis é de 0,5.

Recorreu-se ao *software* SPSS para proceder a esta análise, introduzindo-se um conjunto inicial de 15 variáveis referentes às águas amostradas, nomeadamente a temperatura da água, o pH, a condutividade elétrica, o CO₂ total, a sílica, o sulfureto de hidrogénio, o cloreto, o fluoreto, o sulfato, o cálcio, o sódio, o potássio, o magnésio, o ferro total e o arsénio. O valor obtido para o teste de KMO foi de 0,677. Uma vez que o sulfureto de hidrogénio foi doseado em apenas 38 amostras, foram introduzidos no programa os dados referentes a estas, ignorando-se as amostras AM-31, AM-35, AM-51 e AM-52.

O programa reduziu inicialmente as 15 variáveis introduzidas em 4 fatores distintos, que explicavam cerca de 86% da variabilidade total da amostragem, onde cada variável contribui apenas uma vez para a obtenção de um dos fatores. Analisando os dados obtidos, verificou-se que o fator 4 resultava da repetição de duas variáveis que já contribuíam para a formação de outros fatores, o que originava relações contraditórias com os pontos de águas amostrados, tendo em conta o conhecimento físico-químico adquirido acerca das mesmas. Assim, forçou-se o programa a obter apenas três fatores, em vez dos quatro iniciais, passando estes a representar cerca de 78% da variabilidade total, mantendo-se o valor do teste de KMO em 0,677. No caso das comunalidades verificou-se que a variável ferro total apresentou valor inferior a 0,5, no entanto, optou-se por manter esta análise visto o ferro ser um componente importante nas águas amostradas.

Analisando a matriz de componente (Quadro 6.1), que fornece os valores de contribuição de cada variável para a formação dos fatores é possível verificar que o fator 1 está associado às variáveis temperatura, pH, condutividade elétrica, cloreto, fluoreto, sódio e arsénio. O fator 2 está associado às variáveis CO₂ total, sílica, cálcio, potássio, magnésio e ferro, enquanto o fator 3 está associado às variáveis sulfureto de hidrogénio e sulfato.

Quadro 6.1- Matriz de componente rotativa que indica a contribuição de cada variável para determinado fator.

	Fator 1	Fator 2	Fator 3
T° água	0,684	0,038	0,504
pH	0,852	-0,134	-0,403
CE	0,838	0,452	0,252
CO ₂ total	-0,185	0,575	-0,115
Sílica	0,457	0,527	0,505
Sulf. Hidrogénio	0,178	-0,232	0,859
Cloreto	0,925	-0,022	0,219
Fluoreto	0,888	-0,133	0,229
Sulfato	0,178	-0,112	0,859
Cálcio	0,018	0,940	-0,109
Sódio	0,911	0,290	0,212
Potássio	0,306	0,816	-0,011

Magnésio	0,060	0,896	-0,179
Ferro	-0,362	0,493	0,103
Arsénio	0,804	-0,276	0,310

Projetando os valores de cada fator relativamente às diversas amostras introduzidas no sistema é possível concluir que o fator 1 (Figura 6.13) está relacionado positivamente com a Bica da Água Santa (9), Caldeira Grande (12), do Asmodeu (40) e do Esguicho (41), onde tem uma maior expressão. Esta proximidade com o fator 1 indica que se trata de águas com origem ou influência do sistema hidrotermal profundo. Curiosamente, verifica-se que este fator também se relaciona positivamente, embora com menor expressão, com a água do Caldeirão do Chalet (3) e com a totalidade das águas termais localizadas na zona do Jardim das Termas, com forte influência na nascente Quenturas (5).

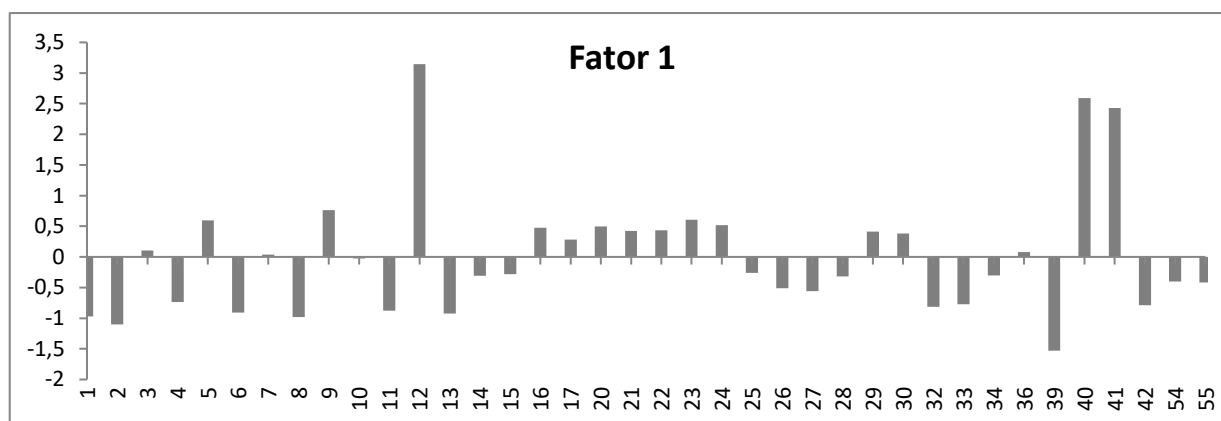


Figura 6.13 – Valores do fator 1 por ponto de amostragem.

Relativamente ao fator 2 (Figura 6.14), verifica-se que a componente gasocarbónica, apesar de importante, não é a principal, sendo ultrapassada pelos sais dissolvidos nas águas, o que se traduz na mineralização da mesma. Assim, verifica-se que neste gráfico os valores positivos correspondem a amostras de águas de mineralização elevada, o que se traduz especialmente bem na amostra 10 (Água Férrea ou BCP I), que corresponde à nascente com maior concentração destes sais, e com alguma componente gasocarbónica. As águas de maior expressão negativa representam exatamente o contrário, ou seja, baixa mineralização, aliada a uma componente gasocarbónica menos relevante. As águas que se mantêm junto do valor 0 representam águas de importante componente gasocarbónica, mas mineralização inferior às restantes, surgindo com pouca expressão no gráfico.

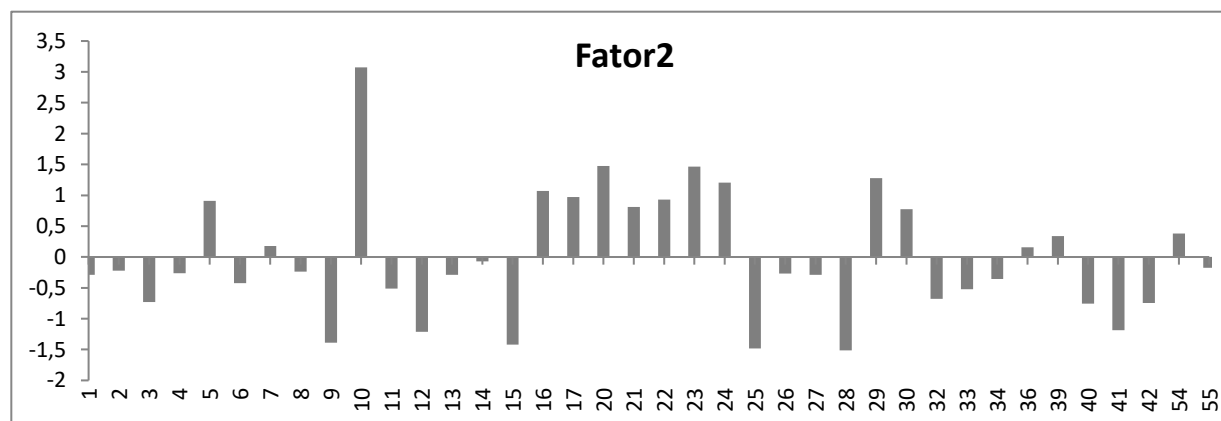


Figura 6.14 - Valores do fator 2 por ponto de amostragem.

O fator 3 (Figura 6.15) torna-se mais específico de algumas nascentes por representar apenas duas variáveis, que se manifestam de forma expressiva na Caldeira da Lagoa das Furnas (39) uma vez que esta apresenta dos valores mais elevados de sulfato e o mais elevado de H_2S . A Caldeira do Asmodeu (40) também surge com alguma expressão uma vez que apresenta o valor mais elevado de sulfato e H_2S considerável. O que se verifica é que a maioria das nascentes com influência destes fatores se localiza na zona da Chã das Caldeiras, onde ocorrem os maiores valores de H_2S , quer em nascentes, quer em fumarolas, com exceção da Caldeira da Lagoa das Furnas, localizada junto à Lagoa das Furnas.

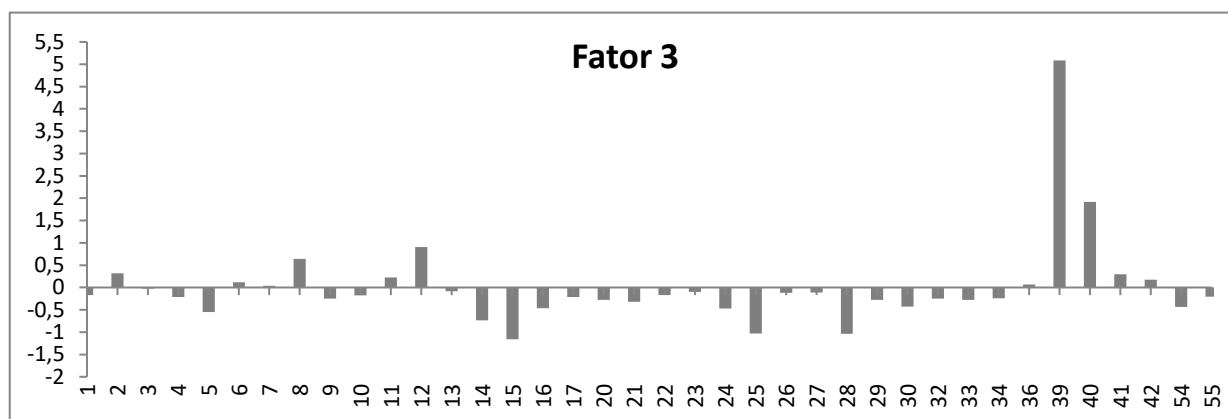


Figura 6.15 - Valores do fator 3 por ponto de amostragem.

6.3.2. Análise de Modo-Q

A análise de *cluster* hierárquico (modo-Q) consiste em agrupar ou agregar diversas variáveis ou dados de acordo com as suas características, apresentando uma matriz de proximidade entre os vários casos através do cálculo das distâncias entre os diversos pontos. Tendo em conta as variáveis introduzidas no programa, este tipo de análise fornece um gráfico, designado dendrograma, que exhibe as diversas nascentes de acordo com a sua proximidade da composição físico-química, encontrando-se estras agregadas, e isolando os casos em que a amostra representa uma variação composicional distinta.

A representação em gráfico desta proximidade entre amostras, na forma de um dendrograma, permite concluir quais as amostras que apresentam maior similaridade e que, por isso, se encontram agregadas neste gráfico, e as que mais se distinguem das restantes. O dendrograma obtido para as 38 nascentes consideradas, com base nas 15 variáveis iniciais, pode ser consultado na Figura 6.16.

A análise deste gráfico deve ser acompanhada da consulta da matriz de proximidade entre amostras, também possível de obter no programa *SPSS*. Nesta matriz, valores de 1 representam a similaridade máxima entre amostras, e valores de 0 a similaridade mínima entre amostras. A utilização em conjunto da matriz e dendrograma põe em evidência a variabilidade físico-química das águas que exsurgem no Vulcão das Furnas, permitindo perceber quais as que podem apresentar origem semelhante, e quais as nascentes que, embora de origem diferente, podem influenciar outras de acordo com a sua distribuição geográfica. No caso específico do estudo do recurso das Quenturas, esta análise constitui uma ferramenta importante na perceção do modelo conceptual da origem desta nascente.

A matriz de proximidade obtida para as 38 nascentes demonstra uma proximidade elevada para várias das amostras, com vários valores a atingir proximidades de 0,9 e superiores. Algumas nascentes apresentam mesmo proximidade máxima, como é o caso dos pares de nascentes Água

Azeda – Água Azeda do Rebentão, Água da Prata – Chalet Frio (Banhos), Pimentel e Castro – Água Azeda do Rebentão, Pimentel e Castro – Água Azeda, Três Bicas Direita – Quenturas, Poço – Quenturas, Morangueira – Torno; Morangueira – Poço e Ribeira de Nossa Senhora – Poça da Dona Beija. No caso específico da nascente Quenturas, além da proximidade perfeita com as nascentes Três Bicas – Direita e Poço, apresenta proximidades da ordem dos 0,998 e 0,999 com as nascentes da Morangueira, Torno, Rego, Três Bicas – Centro e Encosta - Direita, todas localizadas na zona do Jardim das Termas.

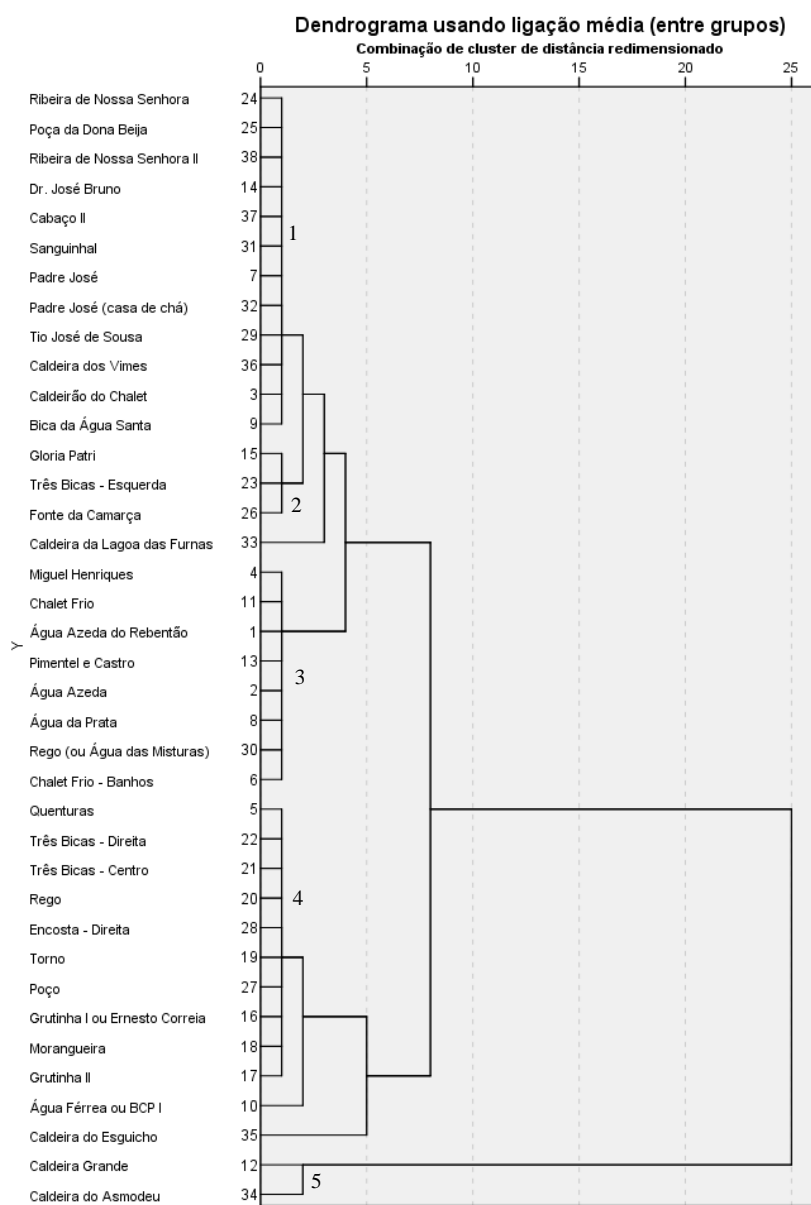


Figura 6.16 – Dendrograma obtido para 38 águas amostradas (SPSS Statistics).

Relativamente ao dendrograma, é possível identificar a formação de cinco agrupamentos distintos de nascentes, numerados de 1 a 5 (cf. Figura 6.16).

O grupo 5 é composto pela Caldeira Grande e do Asmodeu, ambas águas de elevada temperatura, pH básico e CE elevada, localizadas na Chã das Caldeiras. A Caldeira do Esguicho, embora localizada nas imediações e de composição semelhante, surge isolada do grupo 5, apontando-se como possível causa o facto de apresentar CE e mineralização total ligeiramente inferiores.

O grupo 4 é composto por um total de 10 nascentes termais (de Quenturas a Grutinha II na figura 6.16) todas localizadas no Jardim das Termas e com pH ácido. A nascente da Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação I (AM-10) surge isolada entre o grupo 5 e o grupo 4, mostrando no entanto ligação com o último. Esta ligação deve-se, provavelmente, ao facto de a sua temperatura e pH serem semelhantes aos verificados para as amostras do grupo 4, localizadas no Jardim das Termas. O valor de mineralização total apresentado pela Água Férrea é, no entanto, superior ao das nascentes mencionadas, razão pela qual pode surgir isolada. A ligação entre a Água Férrea e o grupo 4 dá-se através da nascente do Torno, provavelmente pelo facto de estas duas nascentes apresentarem os valores mais elevados de ferro total.

O grupo 3 é composto por um total de 8 nascentes frias (de Miguel Henriques a Chalet Frio – Banhos na figura 6.16), todas localizadas na Chã das Caldeiras e com importante componente gasocarbónica.

O grupo 2 engloba um total de 3 nascentes frias – Gloria Patri, Três Bicas – Esquerda e Fonte da Camarça - com localização geográfica dispersa, baixa mineralização e com baixa componente gasocarbónica. Entre o grupo 3 e o grupo 2 surge isolada a Caldeira da Lagoa das Furnas, o que é consistente com a sua composição físico-química, que se distancia quer das restantes caldeiras, quer de outras águas termais de elevada temperatura.

O grupo 1, no entanto, não é tão homogéneo como os restantes, uma vez que as 12 nascentes que o compõem se dispersam geograficamente por vários locais, nomeadamente entre as zonas da Chã das Caldeiras e envolvente e a zona da Poça da Dona Beija e Sanguinhal. Estas 12 nascentes (da Ribeira de Nossa Senhora à Bica da Água Santa na figura 6.16) apresentam características composicionais semelhantes às amostras dos grupos 2 a 5, e não tanto entre si, mas surgem agrupadas no dendrograma, formando o grupo 1. Uma possível explicação para a ocorrência deste agrupamento de nascentes aparentemente distintas pode estar relacionada com a existência de valores de determinados parâmetros que as distinguem dos grupos em que melhor se integrariam. A título específico, verifica-se, pelos dados de capítulos anteriores, que as amostras Ribeira de Nossa Senhora, Poça da Dona Beija, Ribeira de Nossa Senhora II, Padre José e Padre José (casa de chá), pertencentes ao grupo 1 se assemelham às águas termais do grupo 4. No entanto, o grupo 4 é homogéneo, e apresenta valor médio de CE de cerca de 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto as nascentes do grupo 1 referidas apresentam valores variáveis entre 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, menos de metade, o que as excluiu deste grupo. O mesmo é aplicável às nascentes do Cabaço II, Sanguinhal e Caldeira dos Vimes, que embora se assemelhem às nascentes do grupo 4, têm temperatura e CE inferior a estas. A nascente do Caldeirão do Chalet distingue-se das amostras do grupo 4 pela sua temperatura elevada e CO_2 total e CE inferiores. A Bica da Água Santa, embora apresente temperatura e pH consistentes com as amostras do grupo 5, é bem menos mineralizada, o que se traduz numa CE bastante inferior à média deste grupo. As nascentes Tio José de Sousa e Dr. José Bruno assemelham-se às amostras do grupo 3, frias e gasocarbónicas, mas apresentam valores de CO_2 total inferiores aos verificados neste grupo homogéneo. A amostra Dr. José Bruno tem ainda a particularidade de ser mais mineralizada que as restantes águas frias gasocarbónicas, provavelmente em consequência da sua localização na zona dos Banhos Férreos, onde ocorre a nascente de maior mineralização (Água Férrea ou BCP I).

Da análise do dendrograma é ainda possível observar uma relação entre a Caldeira Grande, e, por consequência, a Caldeira do Asmodeu, com as nascentes localizadas no Jardim das Termas (grupo 4, onde se engloba a nascente das Quenturas) e com a Água Férrea ou BCP I. Uma vez que esta ligação não se prolonga as outras nascentes de composição semelhante às do grupo 4, como algumas que surgem no grupo 1, tal pode indicar alguma semelhança composicional entre as águas amostradas

dos grupos 4 e 5, que pode estar relacionada com os elevados valores de CE obtidos para as amostras do grupo 4 face a outras águas termais de composição semelhante mas localizadas em sítios distintos.

6.4. Equilíbrios Químicos

A composição química das águas subterrâneas resulta, essencialmente, das interações água-rocha durante o seu percurso, onde o grau de dissolução dos minerais que constituem as rochas e a precipitação de novos minerais são os principais responsáveis pela mineralização da água, sendo regulados pelo equilíbrio termodinâmico dos vários constituintes do sistema hidroquímico. Através da determinação do estado de equilíbrio químico de uma água é possível obter informações acerca da origem das espécies que nela se encontram dissolvidas, bem como avaliar as características químicas e mineralógicas das rochas onde circula. A determinação do equilíbrio químico parte do conhecimento quantitativo e qualitativo das espécies aquosas presentes na água, avaliando os valores de índice de saturação da água relativamente aos minerais da rocha através de modelos de especiação e cálculo de equilíbrios (CARVALHO, 1999).

O índice de saturação (IS) de uma espécie mineral é dado pela relação entre o quociente de reação (Q) e a sua constante de equilíbrio (K). Considera-se que uma água está sobressaturada relativamente a uma espécie mineral quando o logaritmo do IS é positivo, com tendência para precipitação desta espécie, e que uma água está subsaturada numa espécie mineral quando o logaritmo do IS é negativo, com tendência à sua dissolução. Valores de logaritmo de IS próximos de 0 indicam situações de equilíbrio (*in* FREIRE, 2006).

No âmbito deste trabalho foram calculados os valores de logaritmo do IS das 42 águas amostradas relativamente a 20 fases sólidas, nomeadamente fases de sílica (calcedónia, cristobalite, quartzo, sílica gel, sílica amorfa ($\text{SiO}_{2(a)}$), aluminossilicatos (plagioclases – anortite e albite; feldspato potássico – microclina e adulária; piroxenas – clinoenstatite e diópsido; minerais de argila - montmorilonite-Ca, caulinite, e illite; olivina – forsterite; analcite) minerais carbonatados (calcite, dolomite e siderite) e fluorite. Uma vez que apenas existiam valores de alumínio para 28 das águas amostradas, em algumas não foi possível determinar os valores de Log IS em relação aos aluminossilicatos. Os minerais em questão foram escolhidos com base no conhecimento de que a maioria dos terrenos vulcânicos é constituída por aluminossilicatos e silicatos e com base em estudos anteriores (CARVALHO, 1999; FREIRE, 2006). Os cálculos foram elaborados com recurso ao *software Phreeqc Interactive*, versão 3.1.7.9213, e os resultados obtidos podem ser consultados no Anexo 6 (Quadro 11.13 e 11.14). De forma a averiguar o comportamento geral para cada mineral, foram elaborados gráficos com a variação de Log IS por amostra, para cada mineral analisado, que podem ser consultados no mesmo anexo (Fig.11.55 a 11.74).

Relativamente às fases sólidas de sílica (Anexo 6, Fig.11.55 a 11.59), verifica-se que todas as águas analisadas se encontram sobressaturadas em calcedónia, cristobalite e quartzo. A maioria está igualmente sobressaturada em sílica gel, com exceção das amostras 9, 12, 40 e 41, que se encontram subsaturadas e da amostra 3, que está em equilíbrio. As amostras subsaturadas correspondem a águas termais de elevada temperatura e pH também elevado, e as águas com maior sobressaturação correspondem a águas ricas em CO_2 , na sua maioria frias. No caso da sílica amorfa ($\text{SiO}_{2(a)}$) 11 águas estão sobressaturadas, 25 subsaturadas, estando as amostras 6, 11, 31, 33, 52 e 54 em equilíbrio. As águas sobressaturadas correspondem maioritariamente a águas termais, com exceção de duas águas frias de importante componente gasocarbónica (amostras 2 e 13). As águas sobressaturadas neste

mineral podem originar depósitos siliciosos, e indicar um arrefecimento da água por condução, ou mistura com água termal perto da emergência.

No caso da anortite, todas as águas analisadas estão subsaturadas face a esta espécie mineral, com os valores mais negativos a pertencer a amostras de águas frias gasocarbónicas, com exceção das amostras 26 e 27 (Anexo 6, Fig.11.60). A maioria das águas está igualmente subsaturada face à albite, com exceção das amostras 23 e 25, que estão sobressaturadas (Anexo 6, Fig.11.61). As águas com maior sobressaturação são frias gasocarbónicas, com exceção das amostras 26 e 27, termais.

Relativamente à microclina, todas as águas analisadas estão sobressaturadas, com os valores mais elevados a pertencer a águas frias com pouco CO₂ dissolvido (15, 25 e 28; Anexo 6, Fig.11.62). Para a adularia verifica-se que 11 amostras estão subsaturadas, na sua maioria frias gasocarbónicas e 17 sobressaturadas, na sua maioria termais (Anexo 6, Fig.11.63).

Para as piroxenas analisadas, verifica-se que todas as águas estão subsaturadas em clinoenstatite, com os valores mais próximos do equilíbrio a pertencer a águas termais de elevada temperatura (9, 12, 40 e 41; Fig.11.64) e os valores mais negativos maioritariamente a águas frias gasocarbónicas. No caso do diópsido apenas as amostras 9 e 41 estão sobressaturadas (Fig.11.65).

Todas as águas analisadas estão subsaturadas relativamente à analcite, fluorite e forsterite (Anexo 6, Fig.11.66 a 11.68). Relativamente à analcite verifica-se que os valores mais negativos pertencem a águas frias gasocarbónicas e a duas amostras termais (26 e 27). No caso da fluorite e forsterite os valores mais negativos pertencem a estas águas frias, bem como à amostra 39, termal.

No caso dos minerais de argila, verifica-se que a maioria das águas analisadas está sobressaturada relativamente à montmorilonite-Ca, com exceção das amostras 9, 11, 12, 14, 26 e 27 (Fig.11.69). Todas as águas estão sobressaturadas relativamente à caulinite (Fig.11.70), com exceção da amostra 9, pertencendo os valores mais positivos a águas frias sem componente gasocarbónica (15, 25 e 28). No caso da illite verifica-se que 12 águas estão subsaturadas e 16 sobressaturadas, estas na sua maioria termais, com os valores mais positivos a ser atingidos por águas frias lisas (Fig.11.71).

No que respeita aos minerais carbonatados, apenas duas amostras estão sobressaturadas em calcite (amostras 9 e 41), estando as amostras 5 e 12 próximas do equilíbrio e as restantes subsaturadas relativamente a este mineral (Fig.11.72). A sobressaturação em calcite pode indicar ebulição ou aumento do pH das águas por interação água-rocha, caso em que seria esperado um maior número de amostras sobressaturadas. Verifica-se, de modo geral, que as águas menos subsaturadas correspondem a águas termais, e as que apresentam Log IS mais negativo são frias, com exceção da amostra 39, com o valor mais negativo e temperatura muito elevada. Todas as águas estão subsaturadas em dolomite, com os valores mais negativos de Log IS a pertencer a águas frias e à amostra 39 (Fig.11.73). No caso da siderite estão subsaturadas 28 nascentes e, em consequência, sobressaturadas as restantes 14, com a particularidade de serem nascentes reconhecidamente férreas. As nascentes mais subsaturadas correspondem a águas termais de elevada temperatura (9, 12, 39, 40 e 41; Anexo 6, Fig.11.74).

6.5. Análise Integrada dos Resultados

Como referido, a região do Vulcão das Furnas engloba uma série de nascentes de tipologias e características variadas, que integram a designada “Hidrópole das Furnas”. A ocorrência deste vasto leque de nascentes está estritamente ligada à presença de um aquífero termal em ebulição localizado a uma profundidade de 165 metros e sujeito a uma pressão de 16 bar (CRUZ *et al.*, 1999). Os mesmos autores defendem ainda que as formações geológicas mais superficiais da Caldeira das Furnas encontram-se cortadas por um alinhamento estrutural de gradiente termal elevado, estrutura que serve

igualmente de conduta de passagem ao dióxido de carbono que ascende do manto e que confina a ocorrência de interações água-rocha. Assim, os diferentes graus de aquecimento, de mistura com fluido hidrotermal e de interação água-rocha a que as várias águas são submetidas durante a sua ascensão à superfície determinam a sua tipologia e características (CRUZ *et al.*, 1999). Conforme mencionado nos capítulos introdutórios, as águas das Furnas são geralmente classificadas como frias gasocarbónicas, mesotermiais, hipotermiais e fumarolas (CRUZ *et al.*, 1999; FREIRE, 2006; GEO.AZ, 2016), de acordo com a sua caracterização físico-química. A análise integrada dos resultados apresentados nos capítulos anteriores permite apresentar agora uma classificação para as mesmas águas, partindo, inicialmente, de critérios como a temperatura da água e o pH, e tendo por base as classificações e modelos conceptuais de origem das águas propostos por estes autores.

Assim, é desde logo possível dividir as águas amostradas segundo a sua temperatura, considerando, de acordo com SCHOELLER (1962), como termais as águas da Caldeira das Furnas com temperatura 4°C superior à temperatura média do ar (e.g. águas com temperatura superior a 22°C), e classificando-as segundo o seu pH, em águas básicas (com pH superior a 7) e águas ácidas (com pH inferior a 7; figura 6.17).

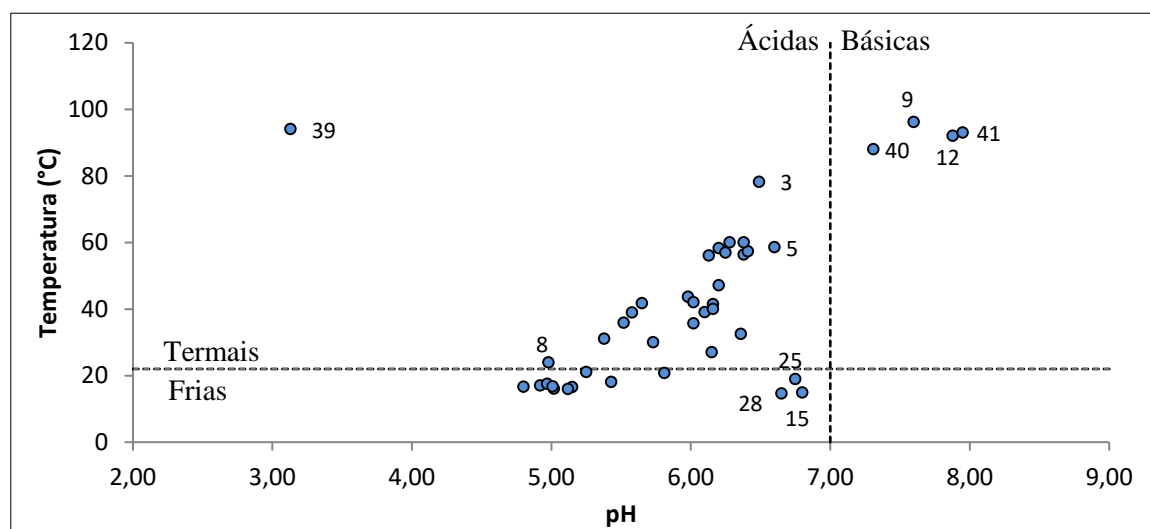


Figura 6.17 – Gráfico da relação entre o pH e a temperatura (°C) das águas amostradas. A linha horizontal demarca as águas frias das termais ($T=22^{\circ}\text{C}$) e a linha horizontal demarca as águas ácidas das básicas ($\text{pH}=7$).

A análise da figura 6.17 permite desde logo identificar um grupo de águas termais de pH básico, representadas pelas amostras 9, 12, 40 e 41, tratando-se de uma nascente (Bica da Água Santa) e três fumarolas (Caldeira Grande, Caldeira do Asmodeu e Caldeira do Esguicho, respetivamente), todas de temperatura elevada, aproximadamente entre 90 e 100°C, embora dados históricos evidenciem temperaturas de até cerca de 118°C para as fumarolas mencionadas (WALLENSTEIN *et al.*, 1988). Estas águas correspondem a emergências do próprio aquífero termal profundo, que se encontra em ebulição, o que explica a sua temperatura (CRUZ & FRANÇA, 2006). É comum a presença de H_2S (média de 5,28 mg/L) e arsénio (média de 869,75 µg/L) nestas águas.

Com temperatura semelhante às anteriores mas pH marcadamente ácido surge a AM-39, Caldeira da Lagoa das Furnas. De acordo com a sua composição (Anexo 3, Quadro 11.5 a 11.7) considera-se que se trata de condensado de fumarola, de acordo com as características apresentadas por diversos autores para esta tipologia de água (e.g. CRUZ *et al.*, 1999; CRUZ & FRANÇA, 2006; FREIRE, 2006; GEO.AZ, 2016), nomeadamente pH francamente ácido, mineralização variável e concentração elevada de sulfato (450 mg/L), aliados a uma temperatura elevada. O condensado de

fumarola representa vapor hidrotermal que ascende do aquífero profundo e condensa à superfície, misturando-se com água subterrânea em aquíferos pouco profundos e água de precipitação (GEO.AZ, 2016; CRUZ & FRANÇA, 2006).

Ainda no domínio das águas termais é possível definir outro grupo, composto por águas termais ácidas, cujo pH varia aproximadamente entre 5,5 e 6,6, tendo a água das Quenturas (5) o pH mais alto. Neste grupo de nascentes existem duas situações particulares, uma descrita pela AM-03, Caldeirão do Chalet, cuja composição se assemelha à das águas termais ácidas, mas com temperatura superior a estas e mais próxima da verificada para as águas termais básicas. Esta nascente será tratada como uma água termal ácida, considerando-se no entanto que representa um membro de transição entre termais ácidas e básicas. A outra situação ocorre na AM-08, Água da Prata, que apresenta pH ácido e temperatura de 23,9°C, o que faz dela uma água termal de acordo com o critério aqui usado. No entanto, composicionalmente é comparável com as águas frias (cf. Anexo 3, Quadro 11.5 a 11.7), chegando mesmo a apresentar uma correlação de proximidade 1 com outra água deste género (Chalet Frio – Banhos) e surgindo como parte integrante do grupo três no dendrograma (Figura 6.16), sem grande relação com as águas termais ácidas. Assim, esta amostra será considerada como um membro de transição, por apresentar temperatura consistente com uma água termal, mas será estudada como uma água fria gasocarbónica por ser similar a estas do ponto de vista composicional.

Estas águas termais ácidas são descritas (CRUZ *et al*, 1999; CRUZ & FRANÇA, 2006; GEO.AZ, 2016) como o resultado da contaminação de aquíferos suspensos por vapor hidrotermal enriquecido em gases vulcânicos, que ascende do aquífero hidrotermal profundo, e cuja temperatura depende do grau de mistura com o vapor hidrotermal. O seu pH ácido a neutro promove a lixiviação ácida das rochas encaixantes, conferindo-lhes mineralização elevada. Tendo por base os dados dos capítulos anteriores, algumas destas nascentes, em especial as que se localizam no Jardim das Termas e Banhos Férreos, podem ser o resultado da mistura de uma água semelhante à das Caldeiras Grande e do Asmodeu (ou seja, de emergências do próprio aquífero termal) com águas de menor temperatura que circulam em aquíferos mais superficiais, dando origem a estas águas termais ácidas. Um modelo deste género pode explicar também os valores de CE elevados (superiores a 1200 µS/cm) que estas nascentes apresentam (Figura 6.2).

As águas frias apresentam todas pH ácido; no entanto, um grupo composto por três nascentes já referidas no decorrer do capítulo 6.2 (Gloria Patri, Três Bicas – Esquerda e Fonte da Camarça) projetam-se junto da reta que representa pH igual a 7 (Figura 6.17). Analisando a composição destas três águas (Anexo 3, Quadros 11.5 a 11.7) conclui-se que esta subida do pH se deve à baixa quantidade de CO₂ total das mesmas, que apresentam também os valores mais baixos de mineralização total observados. Assim, estas nascentes serão designadas por águas frias lisas ou simplesmente águas frias, de forma a serem distinguidas das restantes águas frias que apresentam importante presença de CO_{2(g)}, designadas aqui por águas frias gasocarbónicas. Esta designação provém das importantes concentrações de CO₂ livre e total apresentadas por estas nascentes (Figura 6.3; Anexo 3, Quadro 11.5), com um valor médio de cerca de 1200 mg/L para o CO₂ total. Correspondem às nascentes presentes no grupo 3 do dendrograma, bem como a outras nascentes de temperatura inferior a 22°C, mas com CO₂ total superior a 500 mg/L, nomeadamente Tio José de Sousa (32), Dr. José Bruno (14) e Água do Vale de Alcântara (35). Têm a sua origem em aquíferos suspensos contaminados por gases vulcânicos, nomeadamente CO₂ (CRUZ *et al*, 1999), pelo que apresentam pH ácido e mineralização relativamente baixa quando comparadas com as águas termais. Tendem a surgir, conforme seria expectável, ao longo da anomalia de CO₂ existente no interior da Caldeira do Vulcão das Furnas, de direcção aproximada E-O.

Em síntese, no âmbito deste trabalho considera-se que no Vulcão das Furnas existem as seguintes 5 tipologias de água: (1) águas frias lisas; (2) águas frias gasocarbônicas; (3) águas termais ácidas; (4) águas termais básicas e (5) condensado de fumarolas, atestando a variabilidade composicional deste Vulcão e justificando a designação de “Hidrópole das Furnas”. No quadro 11.15 do Anexo 7 é possível consultar a classificação de cada um dos pontos de amostragem de acordo com as tipologias acima mencionadas, constando também do quadro outras informações pertinentes relativas às águas amostradas. A distribuição espacial dos diversos pontos de água, de acordo com a sua tipologia, pode ser consultada nas figuras 6.18 e 6.19.

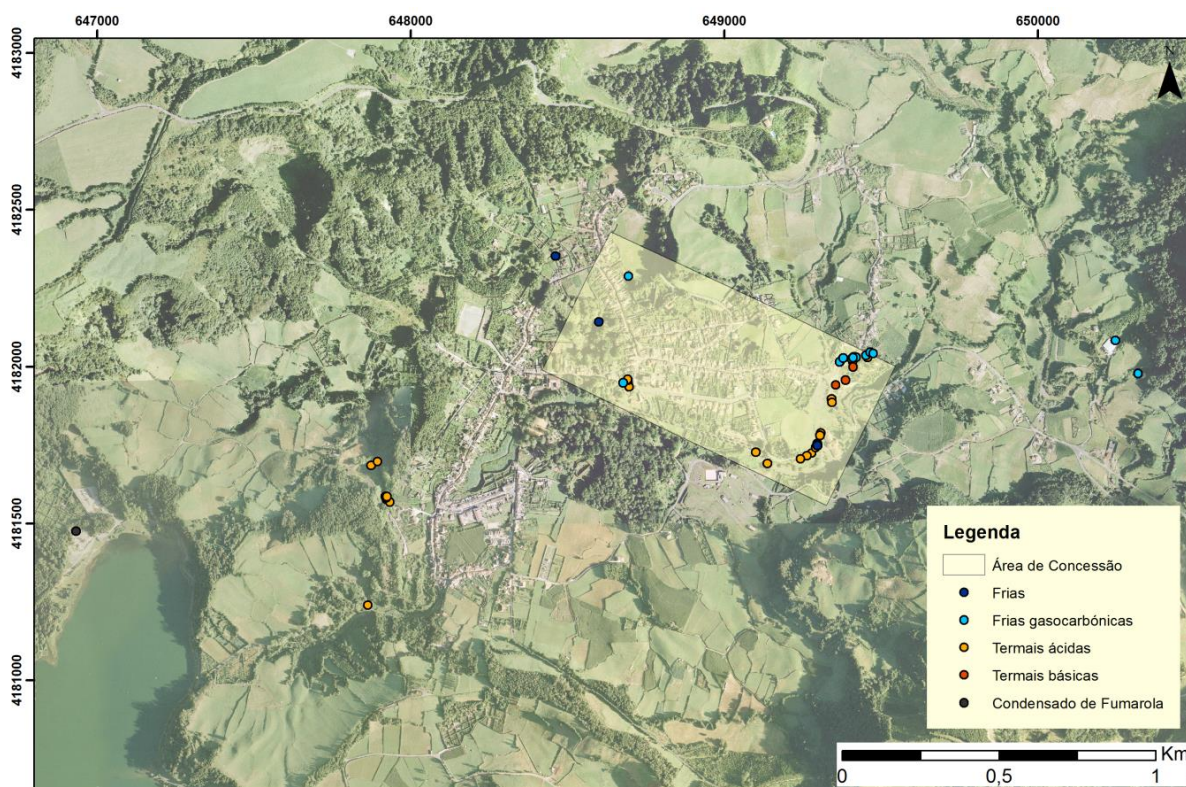


Figura 6.18 – Distribuição espacial das diversas nascentes e fumarolas inventariadas no âmbito deste trabalho de projeto, de acordo com a sua tipologia (Base: ortofotomapa da SRCTE/DSC).

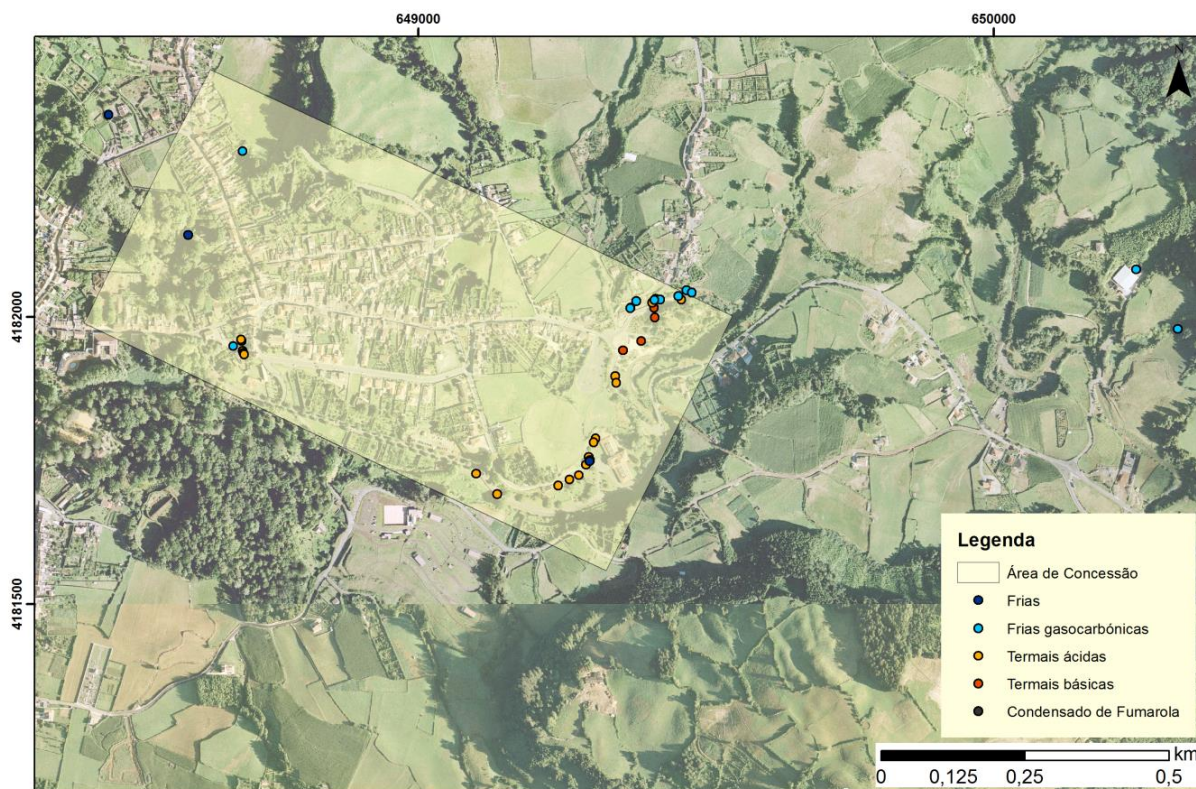


Figura 6.19 – Pormenor da distribuição espacial das nascentes e fumarolas inventariadas no âmbito deste trabalho de projeto, de acordo com a sua tipologia (Base: ortofotomapa da SRCTE/DSC).

7. CARACTERIZAÇÃO ISOTÓPICA DA ÁREA DE CONCESSÃO E SUA ENVOLVENTE

7.1. Isótopos Ambientais Estáveis de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$

As propriedades que caracterizam os diversos elementos químicos são expressas em função do número de prótons existentes no seu núcleo atômico, no entanto, o número de nêutrons presente pode igualmente ser variável. Assim, denominam-se por isótopos os átomos de um mesmo elemento químico cujo número de nêutrons no núcleo difere, conferindo-lhes igual número atômico (número de prótons no núcleo), mas diferente número de massa (soma de prótons e nêutrons no núcleo atômico; CUSTODIO & LLAMAS, 1983).

Os isótopos ambientais são definidos como os que surgem naturalmente na natureza (GEYH et al., 2001).

São considerados estáveis os isótopos cujo número de prótons e nêutrons no núcleo é igual ou que, apesar de diferente, confere estabilidade, como é o caso dos isótopos ^1_1H , ^2_1H , $^{16}_8\text{O}$ e $^{18}_8\text{O}$. (MOOK, 2001).

No âmbito deste trabalho serão de importância os isótopos estáveis de oxigênio ^{16}O e ^{18}O e os isótopos estáveis de hidrogênio ^1H e ^2H , o último denominado por deutério (D), uma vez que são constituintes integrantes da própria molécula de água.

A composição isotópica (R) é dada pela razão entre o isótopo mais pesado e, também menos abundante, e o isótopo mais leve e mais abundante. No caso dos isótopos considerados esta razão é dada por $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}$.

No entanto, a concentração de isótopos estáveis não é expressa em termos da sua razão isotópica (R), mas sim dos desvios desta razão relativamente a um dado padrão. Esta concentração, representada por delta (δ), expressa a relação isotópica entre o isótopo mais pesado e o isótopo mais leve de um dado elemento relativamente a um padrão, calculando-se segundo a equação seguinte (Eq. 7.1):

$$\text{(Eq. 7.1)} \quad \delta = (R_{\text{amostra}} - R_{\text{padrão}})/R_{\text{padrão}}$$

Onde:

δ = concentração isotópica, expressa em permilagem (‰)

R_{amostra} = razão isotópica da amostra ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{amostra}}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}_{\text{amostra}}$)

$R_{\text{padrão}}$ = razão isotópica do padrão ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}_{\text{padrão}}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}_{\text{padrão}}$)

No âmbito dos estudos hidrológicos o padrão utilizado atualmente é o V-SMOW (*Vienna Standard Mean Ocean Water*), que representa o valor médio da composição isotópica da água oceânica, pretendendo exprimir o início e o fim do ciclo hidrológico (IAEA, 1981).

Valores positivos de δ representam um enriquecimento da espécie isotópica pesada na amostra analisada, face ao padrão, e valores negativos demonstram que a amostra sofre uma depleção em isótopo pesado. Uma vez que os desvios entre as amostras e o padrão são geralmente de pequena grandeza, δ é expresso em termos de permilagem (‰) por uma questão de conveniência (IAEA, 1981).

O fracionamento isotópico é a propriedade dos isótopos que permite a sua utilização em hidrogeologia uma vez que promove uma variação na composição isotópica da água a cada alteração de estado sofrida pela mesma (devido a fenómenos de evaporação ou condensação, por exemplo), diferenciando assim uma composição isotópica para cada fase. Deste modo, passa a ser possível determinar a origem da água, bem como os processos de alteração de fase a que foi sujeita ao longo do ciclo hidrológico.

Como consequência do fracionamento isotópico, CRAIG (1961) observou que existe uma relação entre os valores de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ para as águas de precipitação de diversas partes do globo, expressa através da equação (Eq. 7.2):

$$(Eq. 7.2) \quad \delta^2H = 8 \delta^{18}O + 10$$

Esta reta é designada por *Global Meteoric Water Line* ou, Reta Mundial de Águas Meteóricas (RMAM).

A composição isotópica das águas de precipitação pode ser afetada por uma série de processos de troca isotópica e de fracionamento, condicionados por fenómenos de evaporação e de condensação. Deste modo, a composição isotópica varia com a temperatura, a quantidade de precipitação, a altitude, a latitude, o efeito continental ou de distância ao oceano e o efeito sazonal (MINARDI & BOMTEMPO, 2000; MOOK, 2001).

A composição isotópica das águas de precipitação está ainda sujeita a uma série de condições locais que podem originar desvios à RMAM, como é possível verificar na figura 7.1.

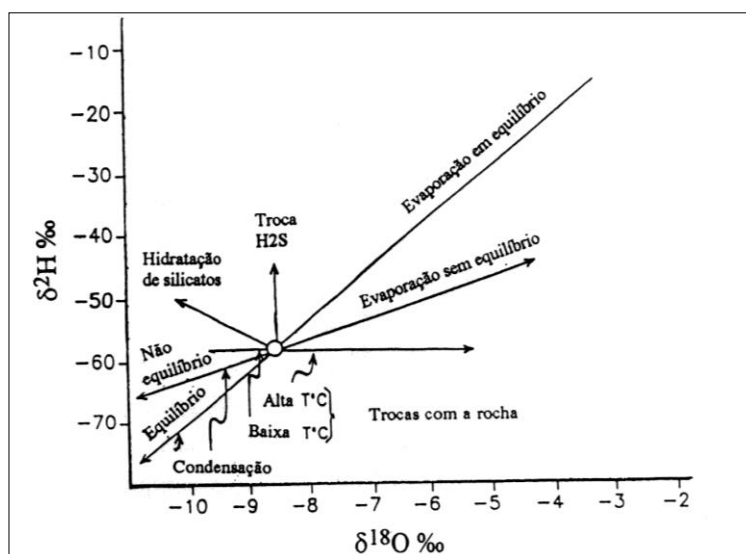


Figura 7.1 – Principais processos envolvidos nos desvios de $\delta^2\text{H}$ e $\delta^{18}\text{O}$ relativamente à RMAM (*global MWL*) (in CARVALHO, 1999).

Interpretação de Resultados

No âmbito deste trabalho de projeto foram amostradas 28 nascentes e fumarolas para análise isotópica de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$, bem como duas amostras colhidas na massa de água superficial da Lagoa das Furnas, uma junto à margem NNO, na proximidade do campo fumarólico (AM-18, Lagoa das Furnas 1), e outra junto à margem SSE (AM-19, Lagoa das Furnas 2). No quadro 11.16 (Anexo 8) podem ser consultados os valores obtidos para as 30 amostras em questão. O quadro incorpora ainda dados de outras três nascentes não analisadas neste trabalho, mas disponíveis em trabalhos de outros autores.

Trata-se das amostras 33 (Água do Rego), 38 (Serra do Trigo) e 40 (Caldeira do Asmodeu; dados de FERREIRA & OSKARSSON, 1999 e CRUZ & FRANÇA, 2006)

Os valores da razão isotópica de oxigênio variam entre um mínimo de -4‰ e máximo de +2,8‰. Os valores mais elevados são ambos positivos e dizem respeito a amostras de águas termais básicas (AM-12 e AM-40, conforme Fig. 11.75 do Anexo 8), representando valores “anômalos” face aos restantes, uma vez que a maioria das águas analisadas apresenta valores entre -4‰ e -3‰. As amostras 9, 18 e 19 apresentam valores ligeiramente menos negativos (entre -2,5‰ e -2,1‰). A AM-09 é uma água termal básica, à semelhança das AM-12 e 40, no entanto estas apresentam valores positivos o que se deve, provavelmente, a perda de vapor por ebulição antes das águas emergirem, enquanto o valor registado para a amostra 9 (-2,5‰) se deve, provavelmente, à mistura entre águas, dado o seu valor próximo dos positivos. As amostras 18 e 19 são de água superficial da Lagoa das Furnas e as suas composições refletem alguma evaporação (-2,3‰ e -2,1‰).

Observa-se alguma dependência entre o conteúdo em $\delta^{18}\text{O}$ e a temperatura, o pH da água e a condutividade elétrica. No caso da temperatura (Anexo 8, Fig.11.76), parece ser visível um efeito de temperatura, que se traduz num maior enriquecimento em $\delta^{18}\text{O}$ à medida que a temperatura aumenta, em especial para amostras com valores de $\delta^{18}\text{O}$ inferiores a -3,5‰. No entanto, existem algumas exceções, nomeadamente as amostras colhidas na Lagoa das Furnas (AM-18 e AM-19) e um grupo de nascentes com temperatura muito semelhante ($\approx 40^\circ\text{C}$) mas com razões isotópicas variáveis (valores entre -3,8‰ e -2,8‰). Para melhor compreender o descrito foi elaborado um gráfico que projeta os valores de δ^{18} vs temperatura, mas distribuídos por tipologia de nascente (Figura 7.2).

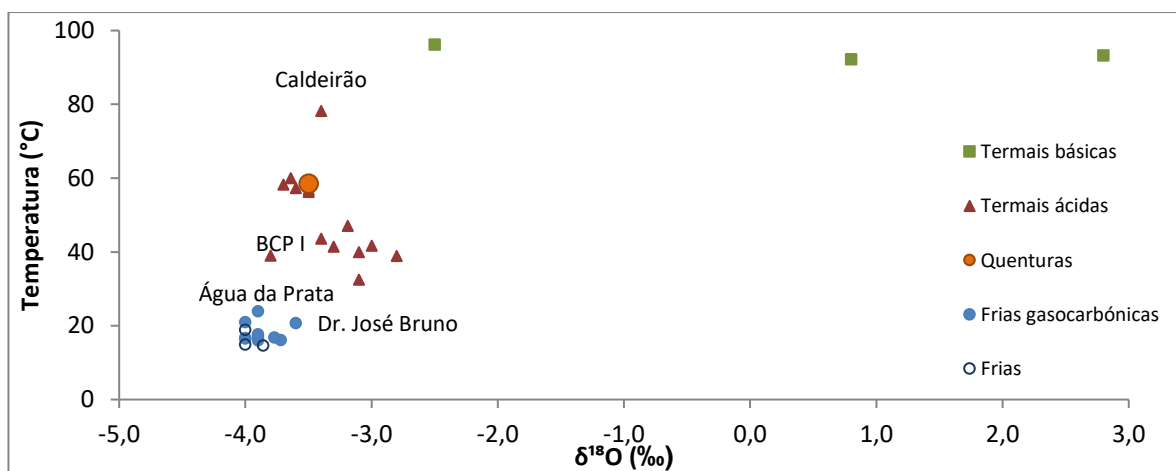


Figura 7.2 - Relação entre a temperatura e o conteúdo em $\delta^{18}\text{O}$ das águas amostradas.

Verifica-se que o grupo de águas que contraria o efeito da temperatura é composto por águas termais ácidas, onde estão incluídas as nascentes localizadas a Sul da estrada que atravessa o Jardim das Termas (16, 17, 20, 21 e 29) e pela Poça da Dona Beija (27) e Ribeira de Nossa Senhora (26), que são mais enriquecidas em $\delta^{18}\text{O}$ relativamente a outras águas termais ácidas de maior temperatura. Tal fenómeno pode estar relacionado com o aquecimento por vapor que estas nascentes sofrem, cuja entrada no sistema as torna isotopicamente mais leves, conforme ocorre na figura, ou devido à mistura com águas termais/interação água-rocha. É ainda possível que a entrada de vapor no sistema possa influenciar os valores isotópicos, levando a que águas de temperatura superior apresentem valores isotópicos mais negativos.

Para a relação condutividade elétrica (CE) vs $\delta^{18}\text{O}$ (Figura 7.3) verifica-se uma evolução semelhante à verificada para a temperatura: à medida que a condutividade aumenta, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ tendem a ser menos negativos. Isto vai de encontro ao mencionado para a temperatura pois, de forma geral, as amostras com CE superior a $500\mu\text{S}/\text{cm}$ são maioritariamente termais, podendo refletir interação água-rocha mais intensa (em consequência da temperatura ou da acidez dada por mistura com vapor hidrotermal) ou a mistura com águas de temperatura mais elevada ou que sofreram ebulição. No entanto, existem também algumas amostras que contrariam esta tendência, estando assinaladas no gráfico mencionado.

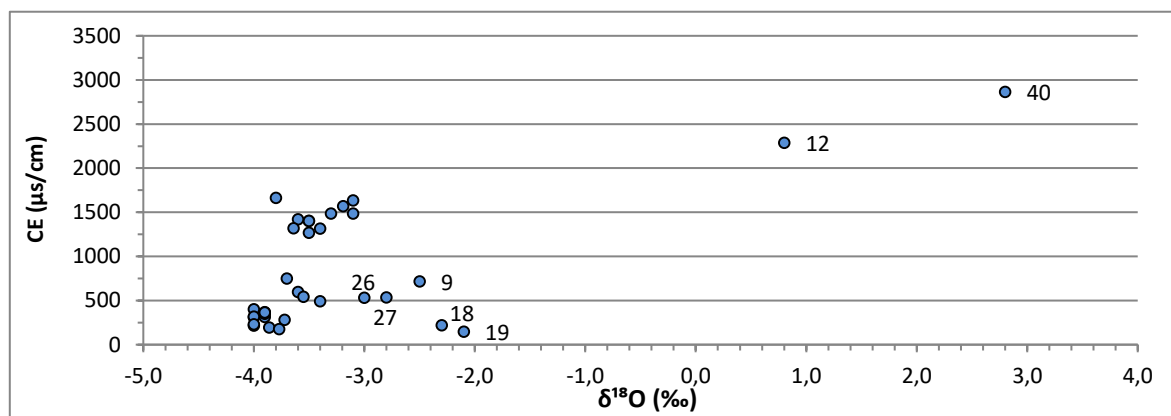


Figura 7.3 - Relação Condutividade Elétrica (CE) vs $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas

A relação com o pH mostra, igualmente, que há uma tendência ao enriquecimento em oxigénio à medida que o pH aumenta (Figura 7.4) confirmando o efeito do enriquecimento por aumento de mineralização ou mistura com águas de elevada temperatura. As amostras 15, 25 e 28 afastam-se desta tendência devido ao valor de pH elevado que apresentam, face ao de $\delta^{18}\text{O}$. Isto deve-se ao facto de se tratar de águas frias com baixo teor de CO_2 livre, o que leva a que o seu pH seja mais elevado do que o de outras amostras que apresentam valores semelhantes de razão isotópica. Analisando o gráfico é possível notar que as duas amostras colhidas na Lagoa das Furnas (AM-18 e 19) apresentam valores díspares de pH (6,49 e 8,19, respetivamente), o que se pode dever, à proximidade a AM-18 ao campo fumarólico, podendo existir algum enriquecimento em dióxido de carbono, que promove a diminuição do pH.

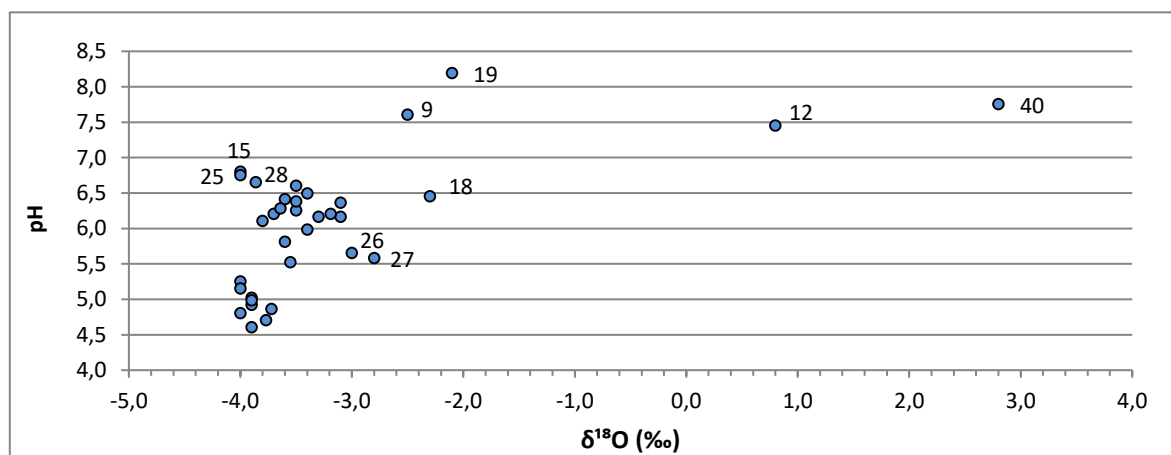


Figura 7.4 - Relação pH vs $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

Relativamente ao efeito de altitude, o esperado é que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ fiquem progressivamente mais negativos à medida que a altitude aumenta. No gráfico elaborado com os dados obtidos (Anexo 8, Fig.11.77) não parece existir grande interferência da altitude, provavelmente em resultado de a maioria das nascentes amostradas se encontrar a cotas semelhantes, em geral entre os 180 e os 200 metros. Numa tentativa de evidenciar o efeito de altitude nestas nascentes foi elaborado um segundo gráfico (Anexo 8, Fig.11.78) onde estas surgem agrupadas por tipologia, sendo excluídas as amostras correspondentes à Lagoa das Furnas. O que se verifica da análise deste gráfico é que as águas termais básicas não respeitam o efeito da altitude, assim como as águas frias, pois apresentam valores muito semelhantes de oxigénio independentemente da altitude. No caso das águas gasocarbónicas, frias e termais, parece existir alguma evolução com a altitude, no entanto, as águas 26 e 27, que se encontram a maior cota e deviam, portanto, apresentar os valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ apresentam, pelo contrário, dos valores mais enriquecidos (-2,8‰ e -3‰, indo contra o postulado no início do parágrafo). Já a AM-15, Gloria Patri, encontra-se a uma altitude superior às restantes e apresenta o valor mais baixo obtido (-4‰).

Uma vez que o efeito da altitude não era visível nas águas amostradas, optou-se por incluir num gráfico os dados de análises isotópicas efetuadas a águas de precipitação, localizadas a altitudes previamente escolhidas e que evidenciassem a ocorrência deste efeito. As informações relativas a cada ponto constam do Quadro 11.17 do Anexo 8, nomeadamente a sua designação, cota, valores de $\delta^{18}\text{O}$ e ^2H . A sua distribuição geográfica pode ser consultada na Figura 3.8. O gráfico resultante consta da Figura 7.5.

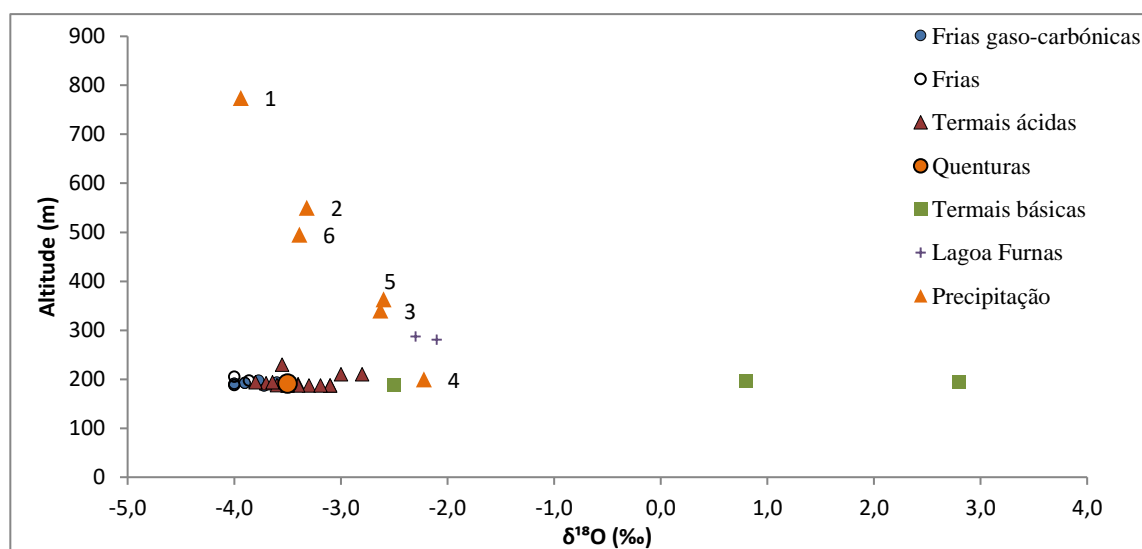


Figura 7.5 - Valores de oxigénio em função da altitude para cada tipologia de água.

Apesar de a esta escala se perder qualquer noção do efeito de altitude para as nascentes e caldeiras amostradas, o mesmo é evidente para as águas de precipitação, conforme seria expectável. Para melhorar a visualização do gráfico o mesmo foi elaborado sem a presença das nascentes termais básicas, e agrupando as restantes nascentes frias e termais (Figura 7.6).

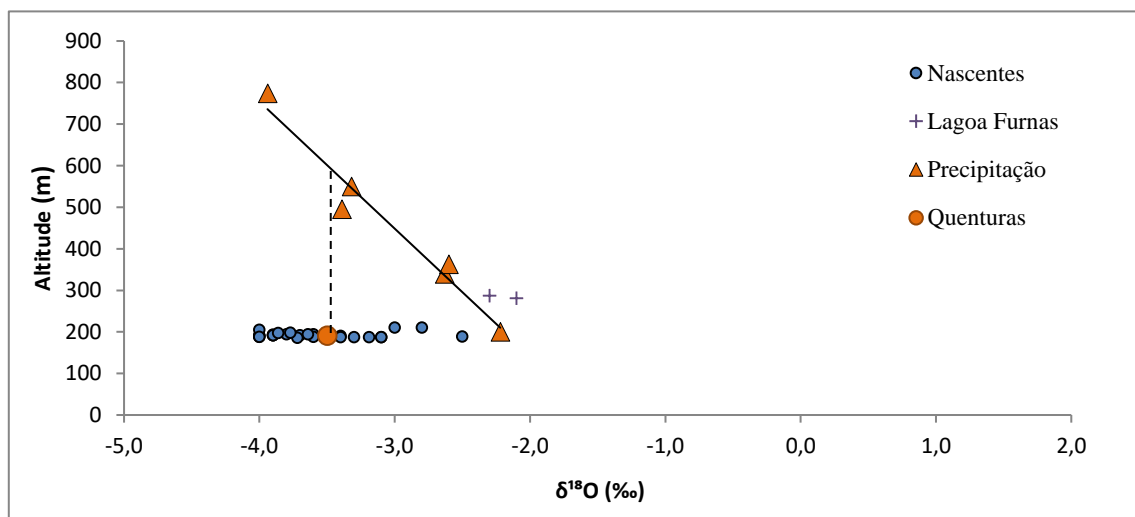


Figura 7.6 - Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs altitude.

Conforme mencionado previamente, verifica-se que as amostras isotópicas da água de precipitação apresentam uma boa correlação com a altitude, ficando demonstrado no gráfico que as águas das nascentes amostradas se infiltram à altitude da precipitação. Para a nascente das Quenturas, estima-se através do gráfico (reta a tracejado) uma zona de recarga que se encontra a pelo menos 600 metros de altitude, não estando portanto circunscrita à envolvente da nascente. Altitudes desta ordem tendem a surgir junto aos bordos na Caldeira, em especial nos bordos N e O, e não no seu interior. No entanto, ressalva-se o facto de este método produzir resultados mais fidedignos quando aplicado aos dados isotópicos de uma série de amostras da água da chuva recolhidas ao longo de um determinado período de tempo, do que quando aplicado a apenas uma colheita pontual. Além disso, há que considerar a possível modificação do conteúdo em $\delta^{18}\text{O}$ por processos hidrotermais. Salienta-se ainda o facto de existir a possibilidade de a precipitação no interior da Caldeira do Vulcão das Furnas ser afetada pelo vapor que ascende dos campos fumarólicos, dando origem a dados não esperados, como amostras de precipitação isotopicamente mais pesadas do que as águas amostradas.

Projetando os dados de $\delta^{18}\text{O}$ obtidos para as amostras analisadas conjuntamente com a RMAM, projetada por CRAIG (1961), e com uma reta local (RAML) calculada para as águas meteóricas do Vulcão do Fogo (CARVALHO, 1999) os resultados não são os esperados (Figura 7.7).

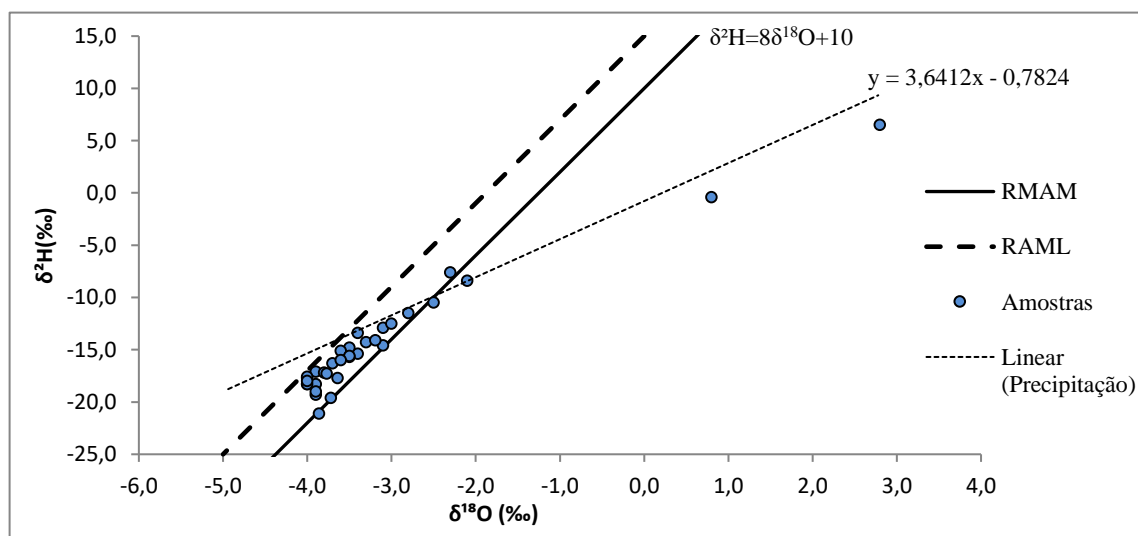


Figura 7.7- Gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ para as águas amostradas e valores de precipitação.

O expectável seria que a reta da precipitação apresentasse um declive semelhante à de CRAIG (1961) como aliás sucede na RAML apresentada no gráfico, que corresponde a dados isotópicos de águas localizadas a O do Vulcão das Furnas. Neste caso a composição isotópica das águas subterrâneas localiza-se ao longo de uma reta com declive diferente ($y=3,6412x-0,7824$ para projeção com águas termais básicas; $y=6,0237x+5,3951$ para projeção sem fumarolas e amostras da Lagoa das Furnas). Avança-se com a hipótese de alguma alteração climática (do tipo microclima) afetar a zona em estudo e causar tais resultados.

As águas amostradas apresentam razão isotópica do Deutério (Anexo 8, Fig.11.79) entre 6,5‰ e -21,1‰, sendo os valores mais elevados 6,5‰ e -0,4‰, ambos pertencentes a águas termais básicas (AM-12 e AM-40). Seguem-se os valores -7,6‰ e -8,4‰, pertencentes às amostras 18 e 19, colhidas na Lagoa das Furnas. As restantes nascentes e caldeiras têm valores variáveis entre -10,5‰ e -21,1‰.

A relação entre o conteúdo em Deutério e a temperatura, pH e condutividade elétrica mostram que à medida que a temperatura, pH e condutividade aumentam, menos negativos são os valores de deutério (Anexo 8, Fig.11.80 a 11.82). As amostras que tendem a demonstrar maiores desvios relativamente a esta tendência são AM-09, AM-12 e AM-40, todas termais básicas, e as amostras pertencentes à Lagoa das Furnas (AM-18 e AM-19). Relativamente ao pH, existem outras amostras que representam anomalias, nomeadamente as amostras 15, 25 e 28 por apresentarem valores de pH superiores a outras com o mesmo valor de deutério. As amostras 26, 27 e 30 parecem igualmente distanciar-se desta tendência.

Considerando o modelo conceptual defendido por CRUZ *et al.* (1999), a água da Caldeira Grande representa uma água proveniente de um aquífero termal, cuja composição isotópica ($\delta^{18}\text{O}=0,3\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}=-3,0\text{‰}$; FERREIRA E OSKARSSON, 1999) é característica de uma água que sofreu ebulição à temperatura de separação de cerca de 180°C, com fração de vapor entre 10 e 20%. Considerando uma fração de vapor intermédia de 15% (y), uma temperatura de 180°C e os dados isotópicos obtidos no âmbito deste trabalho para a Caldeira Grande é possível calcular a composição isotópica do fluido original e do vapor, com base nas equações 7.3 e 7.4 propostas por GIGGENBACH (1991):

$$\text{(Eq.7.3)} \quad \delta l = \delta lv + y\varepsilon$$

Onde:

δl = razão isotópica na amostra de água

δlv = razão isotópica no fluido original antes da ebulição

y = fração de vapor

ε = fator de equilíbrio do oxigénio ($\varepsilon^{18}\text{O}=2,90$) e deutério ($\varepsilon^2\text{H}=7,4$)

$$\text{(Eq.7.4)} \quad \delta v = \delta lv + y\varepsilon - \varepsilon$$

Onde:

δv = razão isotópica na fase de vapor

Através da equação 7.3 é possível calcular que o fluido original da Caldeira Grande (AM-12), antes da ebulição, teria a composição de $\delta^{18}\text{O}=0,36\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}=-1,51\text{‰}$ e, por sua vez, aplicando a equação 7.4 assumindo a separação de vapor adiabática num único passo, este teria composição de $\delta^{18}\text{O}=-2,10\text{‰}$ e $\delta^2\text{H}=-7,8\text{‰}$.

Projetando a composição isotópica do vapor assim calculado juntamente com as nascentes em estudo num gráfico $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ verifica-se que unindo a composição do vapor com uma água de composição inicial (representada pela água fria lisa Gloria Patri – GP) a razão isotópica deste recai sobre uma reta com um declive de 5, representativa das águas termais aquecidas por vapor (águas termais ácidas) conforme a Figura 7.8.

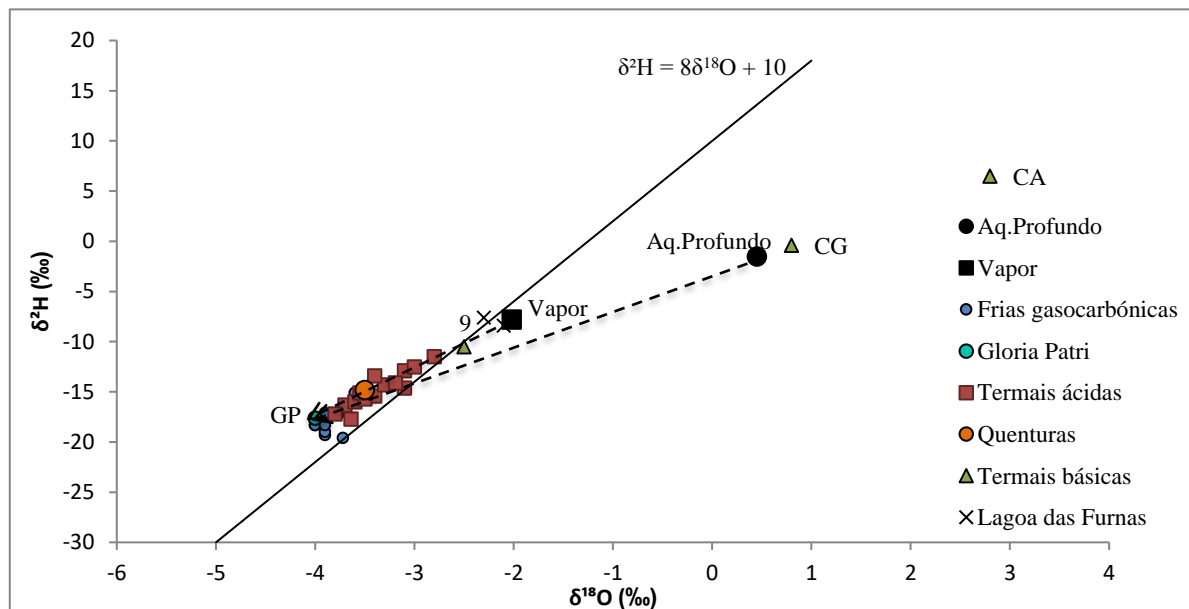


Figura 7.8 – Projeção das razões isotópicas obtidas para o fluido original/aquífero profundo e vapor relativamente às restantes águas amostradas. CG – Caldeira Grande; CA – Caldeira do Asmodeu; GP – Gloria Patri.

A reta mencionada engloba a nascente Quenturas (cf. Figura 7.8), indicando que se trata de uma água termal ácida aquecida por vapor. O mesmo acontece para a nascente da Bica da Água Santa (9), que apesar de ter temperatura e pH semelhantes às restantes termas básicas, não provém do aquífero termal profundo, sendo aquecida por vapor. No entanto, existem várias nascentes que parecem recair na reta relativa ao aquífero profundo, ou no conjunto das retas do aquífero profundo e vapor. Trata-se, principalmente, de nascentes localizadas no Jardim das Termas, a Sul da estrada, como o Torno, Grutinha I e II, entre outras, que têm temperatura inferior e maior mineralização que as nascentes a Norte da estrada. Avança-se com duas hipóteses: podem tratar-se de águas que resultam da mistura de águas do aquífero termal profundo com águas mais superficiais e frias, dando origem a estas águas mais arrefecidas mas mineralizadas, justificando a posição relativamente à reta GP – Aq. Profundo, que podem igualmente receber vapor e CO_2 , o que as acidifica; ou podem tratar-se de águas com maior tempo de residência no aquífero, maior interação água-rocha, o que as torna mais mineralizadas, e consequentemente com maior tempo de circulação, ao longo da qual vão perdendo temperatura. Por não se englobar neste grupo a nascente de Quenturas, esta questão não será aprofundada.

Visto que Quenturas é uma nascente aquecida por vapor, torna-se necessário proceder a um ajuste da altitude de recarga considerada, uma vez que a entrada de vapor no sistema influencia a composição isotópica. Assim, considera-se que a altitude de recarga será semelhante à de uma água fria e pouco mineralizada da região, cuja recarga ocorre a cerca de 800 m (cf. Figura 7.6).

7.2. Isótopo Ambiental Radioativo de Trítio (^3H)

Em certos casos, (por exemplo $^3_1\text{H}_2$), o excesso de prótons ou neutrões no núcleo confere instabilidade ao isótopo, tornando-o instável ou radioativo, levando a que este decaia para um isótopo mais estável, libertando energia, através de um processo denominado decaimento radioativo. A velocidade a que este decaimento se processa é expressa pelo tempo de semivida ($t_{1/2}$), e corresponde ao período de tempo necessário para que desapareça metade da radioatividade, ou seja, o tempo necessário para que metade do isótopo instável se desintegre em estável (MOOK, 2001).

No âmbito deste trabalho o isótopo instável relevante é o isótopo de hidrogénio ^3H , designado por trítio, o mais pesado e o único isótopo radioativo de hidrogénio. A sua concentração na água expressa-se em Unidades de Trítio (U.T.), correspondendo 1 U.T. a cerca de 0,118 Bq/L (MOOK, 2001).

O trítio é produzido naturalmente pelo bombardeamento dos gases da atmosfera terrestre por raios cósmicos, sendo considerado um emissor β puro (MINARDI & BOMTEMPO, 2000), decaindo com um tempo de semivida calculado em 12,32 anos (LUCAS, L.L., UNTERWEGER, M.P., 2000 *in* MOOK, 2001). Deste modo é útil na datação relativa de águas recentes uma vez que possui um tempo de semivida considerado curto, sendo necessário utilizar o isótopo radioativo do carbono ^{14}C na datação de águas mais antigas.

O trítio tem igualmente origem em testes nucleares, verificando-se um aumento da sua concentração na atmosfera a partir do início dos anos 60 do século passado devido à crescente realização dos testes mencionados, chegando a atingir, no hemisfério norte, valores 1000 vezes superiores aos considerados normais. A concentração de ^3H tem vindo a diminuir ao longo do tempo, admitindo-se que uma água da chuva atual tem um valor de cerca de 5 U.T. no inverno, e cerca do dobro no verão (CARREIRA *et al*, 2006).

De um modo geral, os isótopos ambientais estáveis e radioativos têm sido utilizados no estudo da origem e quantificação da recarga de aquíferos através da sua utilização como marcadores ou *tracers* de uma massa de água, permitindo seguir o seu percurso, e também no estabelecimento da idade relativa ou absoluta da mesma (MOOK, 2001). Revelam-se igualmente importantes na identificação de fenómenos de mistura de águas, nomeadamente mistura com águas provenientes de precipitação e águas de superfície, como lagos, rios, etc., e água oceânica.

Interpretação de Resultados

Foram selecionadas 8 amostras para determinação do teor de trítio, nomeadamente AM-21 (Torno), AM-23, 24 e 25 (Três Bicas - Centro, Direita e Esquerda), AM-26 (Ribeira de Nossa Senhora ou Terra Nostra I), AM-27 (Poça da Dona Beija ou Terra Nostra II), AM-29 (Poço) e AM-30 (Encosta - Direita), todas localizadas no Jardim das Termas, nas imediações da nascente das Quenturas, com exceção das amostras 26 e 27. Estas foram selecionadas por serem águas termais ácidas, com importante componente férrea, à semelhança do recurso hidromineral agora em estudo. As amostras AM-05 (Quenturas), AM-15 (Gloria Patri) e AM-34 (Sanguinhal) foram igualmente selecionadas para análise, mas não foi possível obter os resultados em tempo útil pelas razões indicadas no Capítulo 5. Os valores analíticos obtidos podem ser consultados no Quadro 7.1.

Verifica-se, uma vez considerados os valores de erro, que as nascentes amostradas apresentam teores de ^3H muito semelhantes entre si, não existindo teores de trítio que se destaquem significativamente dos restantes.

Quadro 7.1 – Resultados da determinação de ^3H e respectivos parâmetros associados às nascentes amostradas.

ID Amostra	Designação	^3H	Desvio	Altitude	Temperatura	pH	CE
		(U.T.)	(B278)	(m)	(°C)		($\mu\text{S}/\text{cm}$)
AM-21	Torno	1,1	$\pm 0,4$	187	40,0	6,16	1482,0
AM-23	Três Bicas - Centro	1,2	$\pm 0,3$	188	56,3	6,38	1401,0
AM-24	Três Bicas - Direita	0,8	$\pm 0,4$	188	57,3	6,41	1418,0
AM-25	Três Bicas - Esquerda	1,3	$\pm 0,3$	188	18,9	6,75	227,5
AM-26	Ribeira de Nossa Senhora	0,8	$\pm 0,3$	210	41,7	5,65	528,8
AM-27	Poça da Dona Beija	1,3	$\pm 0,4$	210	38,9	5,58	532,0
AM-29	Poço	1,0	$\pm 0,3$	187	47,1	6,20	1565,0
AM-30	Encosta - Direita	1,1	$\pm 0,4$	194	60,0	6,28	1316,0

No entanto, através dos valores obtidos para o trítio (^3H) é possível estimar um valor de datação relativa das águas amostradas, com base no conhecimento de que o valor atual de trítio na atmosfera é de 4 a 5 U.T. e que o tempo de semivida do mesmo é de 12,32 anos. Assim, tendo em conta os valores máximos de ^3H obtidos para as nascentes termais ácidas amostradas, e o conhecimento de que a cada 12,32 anos a concentração deste isótopo decresce para metade, seriam necessários cerca de 23 anos para que uma concentração inicial de 4,5 U.T atingisse valores de 1,1 U.T. Para atingir valores da ordem de 0,8 U.T. seriam necessários cerca de 30 anos. Porém, há a considerar a hipótese de estas águas sofrerem mistura com vapor ou água termal, caso em que as idades isotópicas serão menores.

8. RECURSO HIDROMINERAL DAS QENTURAS

8.1. Caracterização

A nascente das Qenturas, conforme é designada na “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas”, com a referência “3”, ou Água Férrea das Qenturas, como é popularmente conhecida, fica localizada na Zona do Jardim das Termas, conforme mencionado no Capítulo 5, junto ao atual Furnas Boutique Hotel - Thermal & Spa, antigos Banhos Novos/Centro Termal das Furnas. A sua localização geográfica pode ser consultada na Figura 4.6 (nascente com a referência 3).

A nascente das Qenturas encontra-se atualmente captada, abastecendo o estabelecimento termal mencionado anteriormente. Esta é uma prática recorrente, visto que esta nascente das Qenturas abasteceu o “Balneário das Qenturas” desde 1815, e os Banhos Novos, edificados no mesmo local, desde 1863. Alimentou, em conjunto com águas da Caldeira Grande, o estabelecimento do Centro Termal das Furnas, desde 1870 até à data em que o mesmo encerrou (GEO.AZ, 2016).

A nascente das Qenturas é captada, mantendo-se constante a sua composição desde o início do século XIX até aos dias de hoje e melhorando-se as características gerais da sua captação (GEO.AZ, 2016). Trata-se de um poço/tanque de pequena profundidade, com forma aproximadamente retangular, implantado na base do talude onde surgem também outras nascentes termais, como é o caso das nascentes termais das Três Bicas da Encosta e do Rego (Figura 8.1).

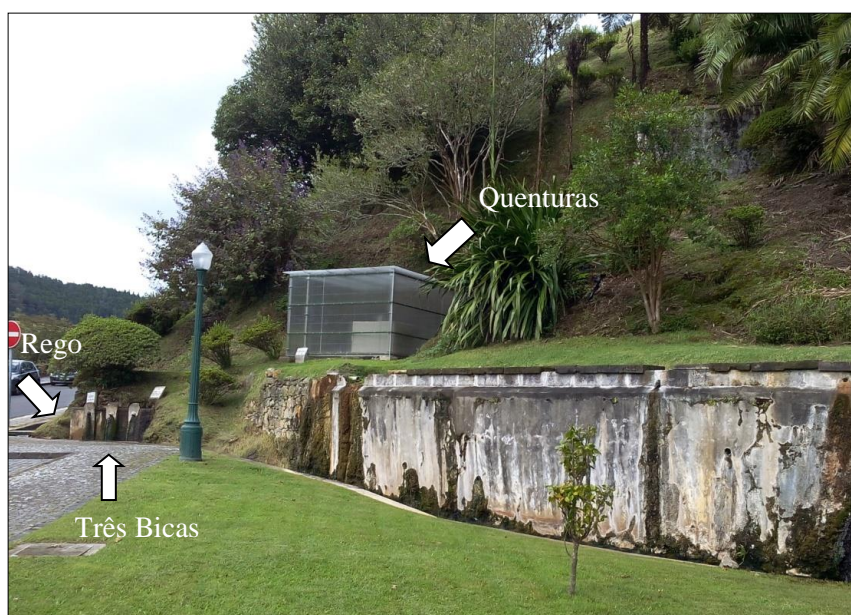


Figura 8.1 – Localização da nascente das Qenturas e das nascentes das Três Bicas e do Rego.

A captação possuía inicialmente paredes em pedra e tampa de madeira (ACCIAIUOLI & NARCISO, 1940), evoluindo para blocos de alvenaria e tampa em cimento. Alguns autores (ACCIAIUOLI & NARCISO, 1940; DIAS, U., 1945) atribuem a designação “Qenturas” ao grupo formado pelo tanque da nascente das Qenturas e pelas nascentes das Três Bicas, considerando que o tanque abastece as bicas quentes das Três Bicas. O tanque das Qenturas sofreu uma intervenção em Março de 2015, no âmbito da abertura do Furnas Boutique Hotel – Thermal & Spa., onde foi removida a tampa em alvenaria e efetuada uma limpeza do fundo do tanque, sendo instalado na estrutura pré-existente um tanque de aço inoxidável, munido de caseta de proteção. Com esta intervenção pretendia-se assegurar o cumprimento de todas as condições higio-sanitárias legisladas para captações de águas minerais naturais, bem como manter a sustentabilidade da própria captação (GEO.AZ, 2016). As

dimensões atuais do tanque são de 2,5 m de comprimento máximo por 0,85 m de largura máxima, com uma profundidade máxima de cerca de 1,7 metros. Possui equipamento de monitorização contínua de diversos parâmetros (e.g. temperatura, pH, condutividade elétrica, nível e caudal), sendo o seu caudal de exploração máximo de 1,7 L/s (GEO.AZ, 2016).

As formações aflorantes na zona de emergência de Quenturas são quase exclusivamente depósitos piroclásticos pomíticos de queda com granulometria variável, mas com claro predomínio de cinzas e *lapilli*, as primeiras por vezes segundo níveis argilosos, dada a sua alteração supergénica. A nível morfológico, e embora a zona circundante da captação se encontre relativamente inalterada, salienta-se a possível presença de um centro eruptivo monogenético com cratera implementada a NNO da captação (Figura 8.2).

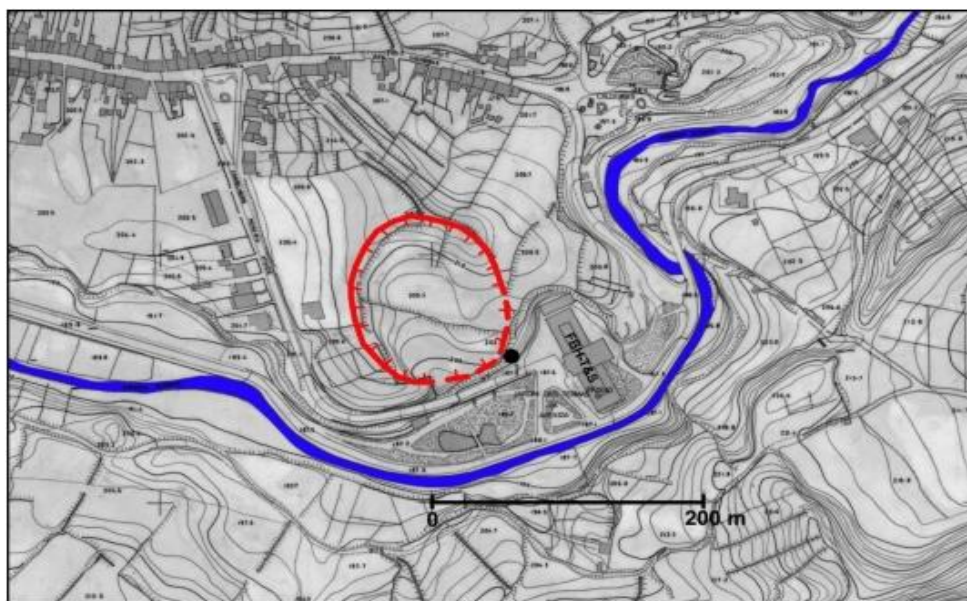


Figura 8.2 – Localização do (provável) arco de cratera localizado a NNO da Nascente das Quenturas (círculo preto). A azul é visível o traçado da Ribeira Quente, que parece contornar esta estrutura morfológica (in GEO.AZ, 2016).

A nascente das Quenturas está englobada nas águas de Tipo 3, termais ácidas, com uma temperatura de 58,5°C, pH de 6,6 (o mais elevado destas águas) e condutividade elétrica de 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Apesar da sua designação de “Férrea” contém apenas 1,6 mg/L de Fe, valor baixo quando comparado, por exemplo, com os 17 mg/L da AM-10 (Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos I). Relativamente a algumas das espécies dissolvidas, apresenta valores de cloreto (66 mg/L) e fluoreto (3,5 mg/L) acima da média do grupo das águas termais ácidas, bem como de cálcio (31,3 mg/L), sódio (230 mg/L) e potássio (38 mg/L), o que se traduz numa mineralização elevada (1353 mg/L). O valor de sílica (150 mg/L) é próximo da média do grupo, verificando-se o mesmo para o magnésio (13 mg/L). O valor de sulfato (11 mg/L) é dos mais baixos para águas termais ácidas, e não há influência de espécies dissolvidas de enxofre. Relativamente aos elementos vestigiais, salienta-se o valor de arsénio de 15 $\mu\text{g}/\text{L}$, que se encontra abaixo da média para as águas termais ácidas (22,63 $\mu\text{g}/\text{L}$), e o facto de apresentar um dos valores mais baixos de alumínio (11 $\mu\text{g}/\text{L}$) para as águas do Tipo 3, tendo, no entanto, dos valores mais elevados de rubídio (131 $\mu\text{g}/\text{L}$) e cobre (7,9 $\mu\text{g}/\text{L}$). Conforme indicado no presente capítulo, as águas termais ácidas são descritas como o resultado da contaminação de aquíferos suspensos pouco profundos por vapor hidrotermal enriquecido em gases vulcânicos, proveniente do aquífero termal mais profundo, gerando águas de temperaturas variáveis, dependendo do grau de mistura com o vapor.

Os valores de CO₂ total obtidos para esta água (891 mg/L) evidenciam a incorporação de gases vulcânicos, em especial o dióxido de carbono. No entanto, e conforme mencionado no capítulo 6, as nascentes localizadas na zona do Jardim das Termas, parecem apresentar uma relação relativamente importante com águas termais básicas profundas, como a Caldeira Grande ou do Asmodeu. Dada a sua relativa proximidade geográfica, e o facto da nascente das Quenturas (e circundantes) apresentarem CE elevada relativamente a outras águas termais ácidas, sugere-se que estas não correspondem unicamente a fenómenos de contaminação por vapor (cujo grau de mistura determina a temperatura da água), mas têm origem numa água hidrotermal profunda, que se mistura com aquíferos mais superficiais de menor temperatura, fazendo com que a temperatura diminua. Durante este processo, haverá igualmente incorporação de gás nestas águas, nomeadamente CO_{2(g)}, visto que apresentam alguma componente gasocarbónica. Esta hipótese é compatível com os valores de CE destas nascentes, e com os dados apresentados no capítulo 6.3.

Por comparação com descrições e análises históricas (e.g. ACCIAIUOLI & NARCISO, 1940; CARVALHO, A., 1955) acredita-se que as principais características físico-químicas desta água se têm mantido razoavelmente constantes ao longo dos anos, apresentando características ligeiramente ácidas, temperatura elevada, influência de CO_{2(g)}, composição química semelhante e fácies bicarbonatada sódica (dados analíticos disponíveis no capítulo 6).

Relativamente aos equilíbrios químicos, a água das Quenturas encontra-se sobressaturada relativamente à calcedónia, cristobalite, quartzo, sílica gel, microclina, aos minerais de argila, e subsaturada relativamente à sílica amorfa, anortite, albite, clinoenstatite, diópsido, aos minerais carbonatados, à analcite, à fluorite e à forsterite.

Os dados isotópicos obtidos indicam que se trata de uma água proveniente de aquíferos mais superficiais aquecidos por ação de uma fonte de vapor profunda, associada a vapores magmáticos, recebendo igualmente CO₂ de origem mantélica. Indicam ainda que se trata de uma água com idades compreendidas entre os 23 e os 30 anos, e com altitude de recarga de cerca de 800 metros, evidenciando que a recarga desta nascente não se restringe à sua zona envolvente mas inclui a bordadura e o topo da Caldeira do Vulcão das Furnas (e.g. setor Norte).

8.2. Modelo Conceptual

Com base nos dados mencionados nos capítulos anteriores foi possível elaborar um modelo conceptual (Figura 8.3) da origem da água das Quenturas, abrangendo da mesma forma a formação de outras tipologias de águas estudadas no decorrer deste trabalho de projeto, nomeadamente fumarolas (Caldeira Grande) e águas frias gasocarbónicas (Água Azeda). Este modelo assenta num perfil geológico interpretativo (O-E/SO-NE) da zona em estudo.

O modelo apresentado é o resultado de um trabalho de equipa entre o mestrando e os seus orientadores, com o intuito de facilitar a interligação da informação acerca do regime hidrogeológico da Caldeira do Vulcão das Furnas e a escassa informação cartográfica de pormenor existente para a mesma. Assim, o regime hidrogeológico apresentado parte dos dados obtidos ao longo deste trabalho, em conjunto com trabalhos anteriores desenvolvidos na mesma área; a informação contida no perfil geológico interpretativo baseia-se numa interpretação da estratigrafia proposta por GUEST (1999; 2015) e do conhecimento fornecido por NUNES (2013; cf. Figura 3.5).

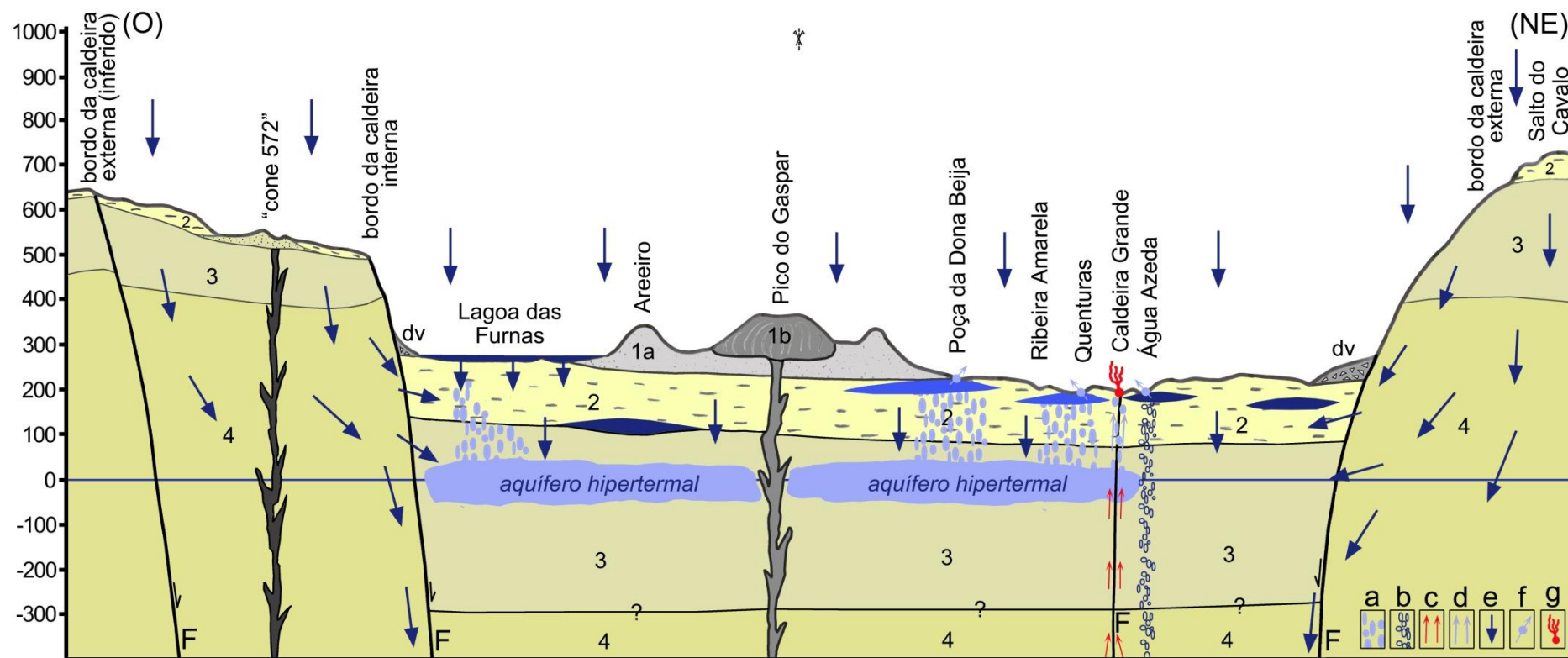


Figura 8.3 – Modelo conceptual da origem da nascente das Quenturas, bem como de outras tipologias de águas presentes na Caldeira do Vulcão das Furnas, com base em perfil geológico interpretativo de um troço da Caldeira do Vulcão das Furnas (O-E/SO-NE).

1a – Erupção histórica do séc.XV (fase inicial hidromagmática, anel pomítico)

1b – Erupção histórica do séc.XV (fase final subaérea, domo traquítico *s.l.*)

2 – Formações do “Grupo Superior das Furnas” (GUEST 1999; 2015), idades inferiores a 5000 anos

3 – Formações do “Grupo Intermédio das Furnas” (GUEST 1999; 2015), idades compreendidas entre 5000 e 30000 anos

4 – Formações do “Grupo Inferior das Furnas” (GUEST 1999; 2015), idades superiores a 30000 anos

Dv – Depósito de Vertente

F – Falha/fratura

a – Vapor (vapor de água + gases)

b – Gases vulcânicos (maioritariamente CO₂)

c – Fluido hidrotermal profundo

d – Água termal

e – Recarga dos aquíferos

f – Nascentes termais e/ou minerais

g – Fumarola

O modelo conceptual proposto pressupõe a existência, em profundidade, de um sistema hidrotermal, que constitui uma fonte de calor, bem como uma fonte de gases vulcânicos (nomeadamente CO_2). De acordo com os dados isotópicos, a recarga do sistema ocorre até altitudes que podem atingir os 800 metros, aproximadamente à altura do bordo NE da caldeira exterior (e.g. Salto do Cavalo). A Lagoa das Furnas contribui igualmente para a recarga do sistema.

O modelo conceptual proposto considera a existência de aquíferos hipertermais (de elevada temperatura) em profundidade, que fornecem vapor (composto por vapor de água e gases) a aquíferos lenticulares mais superficiais, conferindo-lhes temperatura, e dando origem a águas termais. A fase gasosa presente no sistema confere acidez a estas águas, dando origem a águas termais ácidas, aquecidas por vapor, representadas no modelo pelas nascentes das Quenturas e Poça da Dona Beija. Trata-se de nascentes com temperaturas aproximadamente entre 40 e 60°C, com mineralização total superior a 1200 mg/L em vários caos e com alguma componente gasocarbónica (entre 400 mg/L e 1400 mg/L de CO_2 total), que se traduz em valores de pH ácidos. Esta origem está de acordo com os dados isotópicos obtidos (cf. Figura 7.8) uma vez que estas águas se projetam sobre a reta que representa o aquecimento por vapor de águas meteóricas.

Quando os aquíferos lenticulares estão localizados na periferia dos aquíferos hipertermais não recebem o vapor proveniente destes, mas recebem gases vulcânicos de fonte profunda, em maioria CO_2 , que os enriquecem neste componente. As nascentes provenientes destes aquíferos são frias, mas têm importante componente gasocarbónica (e.g. superior a 100 mg/L), como é o caso da Água Azeda. São menos mineralizadas que as águas termais e apresentam pH ácido, em geral inferior a 6.

Para o caso das águas termais básicas, comumente designadas fumarolas, considera-se que representam uma expressão à superfície de fluido hidrotermal profundo, que ascende através de acidentes tectónicos até à superfície, onde emergem com temperaturas próximas da ebulição. Além da temperatura elevada apresentam pH básico (superior a 7-7,5) e mineralização elevada (CE superior a 1800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Não existindo mistura com outras águas durante a ascensão são consideradas como fluido hidrotermal pristino. No modelo da Figura 8.3 estão representadas pela Caldeira Grande. No decorrer do presente trabalho avançou-se com a hipótese de algumas águas termais ácidas, nomeadamente as localizadas na zona Sul do Jardim das Termas, resultarem da mistura entre um fluido hidrotermal profundo com a água de um aquífero mais superficial e de menor temperatura, recebendo igualmente gases de fonte profunda (nomeadamente CO_2). No caso específico das águas analisadas, as que possivelmente têm esta origem (cf. Figura 8.3) exsurgem com características de água termal ácida, mas com temperaturas próximas de 40°C.

As águas frias lisas apresentam mineralização baixa quando comparadas com as anteriores, bem como baixa concentração de CO_2 dissolvido (e.g. CO_2 total inferior a 80 mg/L), não sendo consideradas no modelo conceptual.

Relativamente ao perfil geológico interpretativo em que assenta o modelo conceptual, as formações Inferior (4), Intermédia (3) e Superior (2) das Furnas representadas resultam da interpretação das descrições de GUEST (1999 e 2015) relativamente à estratigrafia que o mesmo propôs para o Vulcão das Furnas. Dada a escassez de trabalhos de cartografia de pormenor, até pelas características do próprio local que dificultam tal estudo, em alguns locais não é possível determinar o limite destas formações.

9. CONCLUSÕES

A “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas foi demarcada pela Direção-Geral de Minas e Serviços Geológicos, em 1964, conferindo *“licença para explorar as nascentes de água mineromedicinal que constituem a Estância Termal das Furnas”*. Engloba uma área de 50 hectares, de forma retangular, e do seu relatório de demarcação constavam trinta e três nascentes mineromedicinais e sete fumarolas da região das Furnas. A necessidade de atualizar os dados relativos a esta concessão foi o ponto de partida para o estudo do recurso hidromineral das Quenturas agora realizado, incluindo a caracterização e estudo das nascentes minerais e termais localizadas na sua envolvente. A revisão e atualização dos pontos de água pertencentes a esta concessão, e outros exteriores à mesma, resultou no levantamento de coordenadas de 43 nascentes e 12 fumarolas, num total de 55 pontos de água inventariados. A nascente das Quenturas, também designada por Água Férrea das Quenturas, é referida na concessão pelo número 3, estando localizada na zona do Jardim das Termas.

Do ponto de vista físico-químico, as várias nascentes e fumarolas amostradas demonstram uma grande variabilidade composicional, que se traduz em temperaturas variáveis entre os 14,6°C e os 96,2°C, pH entre marcadamente ácido (3,13) a básico (7,95), CE baixa (191,20 $\mu\text{S/cm}$) a muito elevada (2515 $\mu\text{S/cm}$), o que se traduz em valores de mineralização muito variáveis. Várias das amostras de água analisadas, quer frias, quer termais, apresentam importante componente gasocarbónica, sendo, no entanto, estes valores superiores num conjunto de águas frias localizadas ao longo de uma anomalia de CO_2 que atravessa a Caldeira do Vulcão das Furnas segundo a direção E-O, influenciando em maior escala as águas localizadas na Chã das Caldeiras, na freguesia das Furnas. A projeção dos valores de CO_2 total obtidos para as nascentes e fumarolas amostradas relativamente a dados de fluxo de CO_2 no solo permitiu concluir que as nascentes com maior concentração deste gás se localizam nas regiões de maior fluxo de CO_2 , notando-se que a concentração do gás terá influência tectónica.

Predomina a fácies bicarbonatada sódica na grande maioria das amostras, existindo algumas de composição mista, nomeadamente bicarbonatadas sulfatadas sódicas, bicarbonatadas cloretadas sódicas e bicarbonatadas sódico-cálcicas, sendo que a fumarola da Caldeira da Lagoa das Furnas é a única amostra que se distancia das restantes, apresentando fácies sulfatada sódica.

Relativamente à presença de sílica nas águas da concessão e zona envolvente, são obtidos valores analíticos elevados, variando entre um mínimo de 55,6 mg/L e 255 mg/L, provavelmente em consequência da presença de águas termais, cuja temperatura favorece as reações de hidrólise. A componente gasocarbónica contribui também para o processo de lixiviação das rochas, favorecendo o aumento da concentração de SiO_2 nestas águas. Relativamente às formas reduzidas de enxofre, verifica-se que algumas águas apresentam valores superiores a 1 mg/, sendo obtidos valores consideráveis deste componente especialmente nas fumarolas, com predomínio da Caldeira da Lagoa das Furnas, junto ao polo fumarólico homónimo e em nascentes localizadas na Chã das Caldeiras, junto do polo fumarólico da freguesia das Furnas.

A aplicação da análise estatística multivariada permitiu concluir que três grupos de variáveis contribuem para a variabilidade química das águas. Para o fator 1 contribuem as variáveis temperatura, pH, CE, cloreto, fluoreto, sódio e arsénio. O fator 2 está associado às variáveis CO_2 total, sílica, cálcio, potássio, magnésio e ferro, enquanto o fator 3 está associado às variáveis sulfureto de hidrogénio e sulfato. Assim, o fator 1 parece estar relacionado com as águas termais associadas ao sistema hidrotermal profundo, nomeadamente as fumarolas da Chã das Caldeiras, bem como a uma série de águas termais de pH ácido localizadas no Jardim das Termas, onde se localiza a nascente das

Quenturas. O fator 2 está relacionado com nascentes com elevado valor de íões dissolvidos e, portanto, mais mineralizadas, surgindo a componente gasocarbónica associada, pelo que os valores mais positivos deste fator são obtidos para águas termais ácidas, que apresentam componente gasocarbónica e são mais mineralizadas do que as águas frias. O fator 3 tem expressão nas águas com maior concentração de sulfato e sulfureto de hidrogénio, com grande predomínio na fumarola da Caldeira da Lagoa das Furnas, mas também representável em outras fumarolas e nascentes da Chã das Caldeiras. No caso específico da nascente das Quenturas, os resultados do fator 1 parecem querer indicar uma relação entre esta nascente e águas termais profundas, representadas pelas fumarolas presentes nas suas proximidades (e.g. na Chã das Caldeiras).

A análise de *clusters* permitiu agrupar as várias nascentes e fumarolas amostradas num dendrograma, de acordo com a sua homogeneidade. Neste gráfico surgiram 5 agrupamentos de nascentes, em que o grupo 5 é constituído por duas fumarolas da Chã das Caldeiras, estando a terceira fumarola aí localizada separada das demais por apresentar menor CE. O grupo 4 abrange todas as nascentes termais localizadas na zona do Jardim das Termas, incluindo a das Quenturas. A nascente Água Férrea ou BCP/Banhos Férreos I surge separada por apresentar uma mineralização superior, apesar de ser composicionalmente semelhante. O grupo 3 engloba nascentes frias localizadas na Chã das Caldeiras, todas com importante componente gasocarbónica, estando agrupadas no grupo 2 as nascentes frias de baixa mineralização e sem componente gasocarbónica considerável. O grupo 1 engloba nascentes composicionalmente diferentes, mas que por apresentarem valores de parâmetros díspares dos restantes grupos, ficam assim agrupadas. Refira-se que as principais razões para a exclusão destas nascentes dos restantes grupos, onde se integrariam melhor do ponto de vista composicional, se devem aos seus valores de CE muito baixos ou elevados face aos verificados nos outros grupos, e a valores de CO₂ que também se revelam demasiado distintos. À semelhança do verificado na análise de modo-R, o dendrograma evidencia uma relação entre as águas da Caldeira Grande e do Asmodeu e algumas águas localizadas no Jardim das Termas.

Assim, de acordo com a análise hidrogeoquímica efetuada para as diversas nascentes inventariadas e amostradas no interior da área de concessão e sua envolvente, e tendo por base outros estudos deste género efetuados no Vulcão das Furnas, procedeu-se a uma classificação da tipologia das águas da “Hidrópole das Furnas”, recorrendo, principalmente, a critérios relacionados com a temperatura de emergência das nascentes e com o seu pH, permitindo identificar 5 tipologias de águas. Assim, as águas são inicialmente divididas em termais (águas que exsurgem com temperatura igual ou superior a 22°C) e frias (com temperatura inferior a 22°C). Relativamente ao pH, verifica-se que algumas nascentes apresentam pH básico (superior a 7,3), maioritariamente caldeiras/fumarolas, pelo que estas se designam por águas termais básicas (tipo 4). As águas termais que apresentam pH inferior a 7 (máximo observado 6,6) são designadas por águas termais ácidas (tipo 3). Uma fumarola distancia-se das restantes por apresentar um pH marcadamente ácido (3,13), correspondendo a um condensado de fumarola (tipo 5), a única deste género que foi estudada. Relativamente às águas frias, a comparação dos valores de mineralização destas águas põe em evidência um conjunto de águas de mineralização muito baixa e de pH próximo de neutro, devido à ausência de uma componente gasocarbónica vincada. Assim, as águas frias são consideradas como frias gasocarbónicas (tipo 2) quando há forte presença deste gás na amostra, e designadas por águas frias lisas, ou simplesmente águas frias, quando tal não sucede (tipo 1).

As águas termais do tipo 5 (condensado de fumarola) representam vapor hidrotermal que ascende do aquífero profundo e condensa à superfície ou próximo desta, misturando-se com águas sub-superficiais e de precipitação. As águas do tipo 4 correspondem a descargas do próprio aquífero termal profundo, que se encontra em ebulição, apresentando por isso temperaturas elevadas (entre 90°

e 100°C) e presença marcada de H₂S e arsênio. As águas de tipo 3 parecem apresentar duas origens distintas, sendo algumas o resultado da contaminação de aquíferos suspensos por vapor hidrotermal enriquecido em gases vulcânicos, que ascende do aquífero hidrotermal profundo através de fraturas ou descontinuidades, estando a temperatura da nascente dependente do grau de mistura com o vapor hidrotermal; outras nascentes do tipo 3, nomeadamente as localizadas na zona Sul do Jardim das Termas, bem como a nascente da Água Férrea ou BCP/Banhos Férreos I, podem resultar da mistura entre águas termais provenientes do aquífero termal profundo (águas tipo 4) com águas de menor temperatura que circulam em aquíferos mais superficiais, dando origem a estas águas termais ácidas. Estas águas possuem no entanto componente gasocarbónica, pelo que incorporam igualmente dióxido de carbono de origem vulcânica, à semelhança das restantes águas termais ácidas. É igualmente possível que este segundo grupo de águas termais ácidas seja o resultado de um maior tempo de residência e maior circulação, conferindo-lhes grau de mineralização distinto e menor temperatura resultante de um maior tempo de circulação, durante a qual arrefecem.

As águas frias do tipo 2 têm origem em aquíferos suspensos contaminados por gases vulcânicos, nomeadamente CO₂, pelo que apresentam pH ácido e mineralização relativamente baixa quando comparadas com águas termais. Quando não ocorre esta contaminação, surgem as nascentes frias do tipo 1.

A determinação de ¹⁸O e ²H foi efetuada para um total de 29 nascentes e fumarolas e nos dois pontos da Lagoa das Furnas, sendo também apresentados neste trabalho dados de outros autores para algumas das nascentes. Foram ainda colhidas seis amostras de águas de precipitação para análise das mesmas razões isotópicas. O trítio foi determinado em 8 amostras de nascentes.

Os valores da razão isotópica de oxigénio variam entre um mínimo de -4‰ e máximo de 2,8‰. Os valores mais elevados registados são ambos positivos, pertencendo a amostras de águas termais básicas. Projetando os valores de ¹⁸O relativamente à temperatura de exurgência da água, distribuídos por tipologia de nascente, verifica-se que existe uma correlação negativa para as águas termais ácidas, onde se engloba a nascente das Quenturas, uma vez que tendem a ficar isotopicamente mais leves à medida que a temperatura aumenta. Tal fenómeno pode estar relacionado com o aquecimento por vapor apontado como origem de algumas destas nascentes, cuja entrada no sistema as torna isotopicamente mais leves. Para a relação condutividade elétrica (CE) vs $\delta^{18}\text{O}$ verifica-se uma evolução semelhante à descrita para a temperatura: à medida que a condutividade aumenta, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ são, em geral, menos negativos. A relação com o pH demonstra que há enriquecimento em oxigénio à medida que o pH aumenta. Relativamente ao efeito de altitude, o expectável é que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ fiquem progressivamente mais negativos à medida que a altitude das nascentes aumenta. No entanto, este efeito é pouco visível, uma vez que a maioria das amostras colhidas se localiza a cota semelhante. Projetando estes valores agrupados por tipologia de nascente, verifica-se que as águas termais básicas não respeitam o efeito da altitude, assim como as águas frias, pois apresentam valores muito semelhantes de oxigénio independentemente da altitude. No caso das águas gasocarbónicas, frias e termais, parece existir alguma evolução com a altitude; no entanto, as águas 26 (Ribeira de Nossa Senhora ou Terra Nostra I) e 27 (Poça da Dona Beija ou Terra Nostra II), que se encontram a maior cota e deviam, portanto, apresentar os valores mais negativos de $\delta^{18}\text{O}$ apresentam, pelo contrário, dos valores mais enriquecidos (-2,8‰ e -3‰), talvez devido a possível interação com águas provenientes da Lagoa das Furnas. A amostra 15, Gloria Patri, encontra-se a uma altitude superior às restantes e apresenta o valor mais baixo obtido (-4‰), provavelmente por se tratar de uma água fria lisa.

A projeção dos valores isotópicos de oxigênio e deutério obtidos para a precipitação, conjuntamente com a RMAM (segundo CRAIG, 1961) e com uma reta local (RAML) não produziram os resultados esperados, uma vez que a reta definida pelas águas deveria seguir o declive apresentado pela RMAM e RAML, com maior ou menor deslocamento. No entanto, o que se verifica é que a reta da precipitação das Furnas tem um declive bastante díspar e cruza as restantes retas. Pressupõe-se que a localização e características da própria caldeira possam influenciar os fenómenos de fracionamento isotópico que nela ocorrem, nomeadamente a mistura com vapor proveniente das fumarolas.

O cálculo da composição isotópica do fluido original e do vapor, com base nos dados isotópicos obtidos para a Caldeira Grande e nos trabalhos de CRUZ *et al.* (1999) e GIGGENBACH (1991), permitiu identificar uma série de nascentes que se projetam na reta que representa o aquecimento por vapor, nomeadamente a nascente das Quenturas (ou Água Férrea das Quenturas) e outras localizadas nas suas imediações, confirmando a origem desta nascente. Foram ainda identificadas algumas nascentes termais básicas associadas à reta do aquífero profundo, nomeadamente Caldeira Grande e do Asmodeu, conforme esperado; além destas surgem sobre a reta algumas nascentes termais ácidas, ou na junção das duas retas. Trata-se de águas termais ácidas, e sugerem uma ligação com águas termais básicas na sua origem.

O recurso hidromineral das Quenturas (ou Água Férrea das Quenturas, como é popularmente conhecido) referido pelo número 3 na “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas” encontra-se captado atualmente, com um caudal máximo de exploração de 1,7 L/s, e abastece o estabelecimento termal Furnas Boutique Hotel Thermal & Spa. A água das Quenturas é termal ácida (Tipo 3), exsurge com uma temperatura de 58,5°C, pH de 6,6 (o mais elevado destas águas) e condutividade elétrica de 1400 μ S/cm. Apesar da sua designação de “Férrea” contém apenas 1,6 mg/L de Fe, valor baixo quando comparado com outras nascentes da “Hidrópole das Furnas” que apresentam até 17 mg/L de ferro. Trata-se de uma água de fácies bicarbonatada sódica, com valores de Cl e F acima da média do grupo das águas termais ácidas, bem como de Ca, Na e K, o que se traduz numa mineralização total elevada (1353 mg/L). O valor de SiO₂ (150 mg/L) é próximo da média do grupo, bem como o do Mg. O seu valor de SO₄ (11 mg/L) é dos mais baixos obtidos para águas termais ácidas e não há influência de espécies dissolvidas de enxofre em concentração identificável. Salienta-se ainda o seu valor de arsénio de 15 μ g/L, que se encontra abaixo da média para as águas termais ácidas e representa um dos valores mais baixos de As para as águas Tipo 3. Tem, no entanto, dos valores mais elevados de Rb e Cu.

Relativamente à sua génese, o recurso hidromineral das Quenturas pertence ao grupo de águas termais ácidas (Tipo 3) que têm origem em vapor hidrotermal enriquecido em gases vulcânicos, proveniente de um aquífero termal mais profundo, que contamina aquíferos superficiais suspensos, fazendo com que a sua temperatura aumente. Durante este processo ocorre igualmente incorporação de gás nestas águas, nomeadamente CO_{2(g)}, visto que apresentam alguma componente gasocarbónica. Esta origem é compatível com os valores de CE destas nascentes, com os dados da análise estatística multivariada e com os dados isotópicos.

Os dados da análise de isótopos ambientais estáveis indicam para esta nascente uma altitude de recarga que se situa a uma cota de até 800 metros, evidenciando que a recarga da mesma ocorre sobretudo no bordadura e topo da caldeira do Vulcão das Furnas. Os dados relativos ao isótopo instável de trítio indicam que as águas termais localizadas no Jardim das Termas, incluído portanto, a nascente das Quenturas, apresentam uma idade entre 23 e 30 anos.

10. Referências Bibliográficas

ACCIAIUOLI, L., & NARCISO, A. (1940) – *Águas minerais do continente e ilha de S. Miguel*. Direcção Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa, 162 pp.

BRITO DE AZEVEDO, E.M.V. (2013). *Clima, balanço hídrico e modelação hidrológica de superfície da área de implantação do projeto*. In: PROFICO Ambiente e Ordenamento, Lda., “ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL. APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO REVERSÍVEL DA LAGOA DAS FURNAS”. Relatório Técnico. Julho.

BOOTH, B., CROASDALE, R. & WALKER, G. P. L. (1978). *A quantitative study of five thousand years of volcanism on São Miguel, Azores*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 228, pp. 271–319.

CARMO, R., (2013) – *Estudos de neotectónica na ilha de S.Miguel, uma contribuição para o estudo do risco sísmico no arquipélago dos Açores. Apêndice – Carta tectono-vulcânica da ilha de S.Miguel (Açores)*. Tese de Doutoramento no ramo de Geologia, especialidade de Vulcanologia. Departamento de Geociências, Universidade dos Açores.

CARMO, R., MADEIRA, J., FERREIRA, T., QUEIRÓZ, G. & HIPÓLITO, A., (2015) - *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago): Volcano-tectonic structures of São Miguel Island, Azores*. Geological Society, London, Memoirs, Volume 44, Chapter 6; pp. 65-86.

CARREIRA, P. M., VALERIO, P., NUNES, D. & ARAÚJO, M.F. (2006) – *Temporal and seasonal variations of stable isotopes ($\delta^2\text{H}$ and $\delta^{18}\text{O}$) and tritium in precipitation over Portugal*. Isotopes in Environmental Studies – Aquatic Forum 2004. IAEA, Monaco, pp.370-373.

CARVALHO, A.H., (1955) – *Estudos Analíticos de Águas Termais – Caldas da Rainha, Caldas de Monchique e Ilha de S. Miguel (Furnas e Ribeira Grande)*. Direcção-Geral de Minas e Serviços Geológicos, Lisboa, 175 pp.

CARVALHO, M.R., (1999) – *Hidrogeologia do Maciço Vulcânico de Água de Pau/Fogo (São Miguel – Açores)*. Dissertação apresentada à Universidade de Lisboa para obtenção de grau de Doutor em Geologia, na especialidade de Hidrogeologia. Lisboa. 445 pp.

CARVALHO, M. R., (2013) – 3.5.4. *Recursos Hídricos Subterrâneos*. In: PROFICO Ambiente e Ordenamento, Lda., “ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL. APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO REVERSÍVEL DA LAGOA DAS FURNAS”. Relatório Técnico. Julho.

CRUZ, J.V., COUTINHO, R.M., CARVALHO, M. R., OSKARSSON, N. & GISLASON, S. R. (1999), *Chemistry of Waters from Furnas Volcano, São Miguel, Azores: fluxes of volcanic carbon dioxide and leached material*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 92, pp. 151-167

CRUZ, J.V., (2001) – *Recursos Subterrâneos. Plano Regional da Água da Região Autónoma dos Açores. Relatório Técnico-Científico 03/DGUA*. Centro de Geologia Ambiental, DG/UA, Ponta Delgada, 453 pp.

CRUZ, J.V., (2004) – *Ensaio Sobre a Água Subterrânea nos Açores: História, Ocorrência e Qualidade*. Ed. Secretaria Regional do Ambiente, Direcção Regional do Ordenamento do Território e Recursos Hídricos. 288 pp.

CRUZ, J.V., & FRANÇA, Z. (2006) – *Hydrogeochemistry of thermal and mineral springs of the Azores archipelago (Portugal)*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 151; pp. 382-398.

CUSTODIO, E. (1978) – *Geohidrologia de terrenos de islas volcánicas*. Centro de Estudios Hidrográficos – CEDEX, Publ. 128. Madrid. 303 pp.

CUSTODIO, E., & LLAMAS, M.R., (1983) – *Hidrología Subterránea*, 2ª Edição, Editorial Omega, Barcelona, Volume 1, 1157 pp.

DIAS, U. M., (1945) – *História do Vale das Furnas*. Tipografia de “A Crença”, Vila Franca do Campo, Rua Visconde da Palmeira. 2ª Edição. 142 pp.

DIRECÇÃO REGIONAL DO AMBIENTE/DIRECÇÃO REGIONAL DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E RECURSOS HÍDRICOS [DRA/DROTRH] (2001) – *Plano Regional da Água*. Relatório Técnico.

FERREIRA, T., & OSKARSSON, N., (1999) – *Chemistry and isotopic composition of fumaroles discharges of Furnas caldera*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 92, pp. 169-179.

FRANÇA, Z., CRUZ J. V., NUNES J.C & FORIAZ, V.H., (2003) – *Geologia dos Açores: Uma perspectiva actual*, Açoreana 10, pp. 11-140.

FREIRE, P. (2006) - *Águas Minerais e Termas da ilha de São Miguel (Açores): caracterização hidrogeológica e implicações para a monitorização vulcanológica*. Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Vulcanologia e Riscos Geológicos, Universidade dos Açores, 173 pp.

GASPAR, J.L., FERREIRA, T., QUEIROZ, G., WALLENSTEIN, N., PACHECO, J., GUEST, J., DUNCAN, A., COLE, P. (1995) – *Evolução morfoestrutural do vulcão das Furnas (ilha de S.Miguel, Açores)*. Universidade do Porto, Faculdade de Ciências, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico, IV Congresso Nacional de Geologia. Membrane 4, 999-1003.

GEO.AZ (2016) – *Plano de Exploração da Captação “Quenturas” (Furnas, Ilha de São Miguel)*. Asta Atlântida – Sociedade de Turismo e Animação, S.A., 27 pp.

GEYH, M., D’AMORE, F., DARLING, G., PACES, T., PANG, Z & ŠILAR, J. (2001) - *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle – Principles and Applications, Vol. 4: Groundwater – Saturated and Unsaturated Zone*. IHP-V Technical Documents in Hydrology, no. 39, UNESCO-IAEA, Paris.

GIGGENBACH, W.F. (1991) – *Isotopic composition of geothermal water and steam discharges*. In D’AMORE, F. (1991). Application of Geothermal Reservoir Development. UNITAR, 408 pp.

GOMES, V. (2013) – *Análise estatística multivariada aplicada a dados hidrogeológicos*. Dissertação de mestrado em Estatística, Faculdade de Ciências, Lisboa. 116 pp.

GUEST, J.E., DUNCAN, A.M., COLE, P.D., GASPAR, J.L., QUEIROZ, G., WALLENSTEIN, N. & FERREIRA, T. (1994) – *Preliminary report on the volcanic geology of Furnas volcano, São Miguel, the Azores. Eruptive History and Hazard*. Open File Report: number 1, CEC Environment: ESF Laboratory Volcano; 24pp.

GUEST, J.E., GASPAR, J.L., COLE, P.D., QUEIROZ, G., DUNCAN, A.M., WALLENSTEIN, N., FERREIRA, T. & PACHECO, J. M. (1999) – *Volcanic geology of Furnas volcano, São Miguel, Azores*. Journal of Volcanology and Geothermal Research 92, pp. 1-29.

GUEST, J.E., PACHECO, J.M., COLE, P.D., DUNCAN, A.M., WALLENSTEIN, N., QUEIROZ, G., GASPAR, J.L. & FERREIRA, T. (2015) – *Volcanic Geology of São Miguel Island (Azores Archipelago): The volcanic history of Furnas Volcano, São Miguel, Azores*. Geological Society, London, Memoirs, Volume 44, Chapter 9; pp. 125-134.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY [IAEA] (1981) – *Stable Isotope Hydrology. Deuterium and Oxygen-18 in the water cycle*. IAEA, Vienna, Technical Reports Series 210, 340 pp.

MINARDI P.S., & BOMTEMPO, V.L. (2000) – *Traçadores e técnicas isotópicas em hidrologia subterrânea: a experiência do CDTN/CNEN*, Brasil. 1st Joint World Congress on Groundwater, Brasil.

MOOK, W. (2001) – *Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle – Principles and Applications, Vol. 1: Introduction, Theory, Methods, Review*. IHP-V Technical Documents in Hydrology, no. 39, UNESCO-IAEA, Paris.

MOORE, R.B. (1990) - *Volcanic geology and eruption frequency, São Miguel, Azores*. Bull. Volcanol., 52: 602-614.

MOORE, R.B. (1991a) - *Geology of three late Quaternary stratovolcanoes on São Miguel, Azores*. USGS Bulletin 1900, 46 pp., U.S. Geological Survey, Denver.

MOORE, R.B. (1991b) - *Geologic map of São Miguel, Azores*. U.S. Geological. Survey. Misc. Invest. Ser. Map I – 2007, scale 1:50000, 1 folha.

NUNES, J.C. (1999) – *A atividade vulcânica na ilha do Pico do plistocénico superior ao holocénico: mecanismo eruptivo e hazard vulcânico*. Dissertação para a obtenção do grau de Doutor em Geologia, Universidade dos Açores, Ponta Delgada, 357 pp.

NUNES, J.C. (2004). *Geologia*. In: FORJAZ, V.H. – *Atlas Básico dos Açores*. Observatório Vulcanológico e Geotérmico dos Açores (Ed). Ponta Delgada, p. 60-62.

NUNES, J.C. (2013). 3.3. *Geomorfologia, Geologia e Sismotectónica. Caracterização da Situação de Referência*. In: PROFICO Ambiente e Ordenamento, Lda., “ESTUDO DE IMPACTE AMBIENTAL. APROVEITAMENTO HIDROELÉTRICO REVERSÍVEL DA LAGOA DAS FURNAS”. Relatório Técnico. Julho.

NUNES, J.C. (2015). 4.2. *Geologia. Estudos e Trabalhos de Base*. In: NORMA AÇORES, “Aproveitamento Hidroelétrico Reversível da Lagoa das Furnas (AHRLF). Estudo Prévio. Outubro.

NUNES, J.C., FRANÇA, Z., FORJAZ, V.H., MACEDO, R. & LIMA, E.A. (2004) - *Poligenetic volcanoes of Azores archipelago (Portugal): size, nature, eruptive styles and related volcanic hazard*. In: Poster—32nd International Geological Congress—Abstracts (part 1). Firenze, Itália, pp 336.

NUNES, J. C. & CARVALHO, J. M; (2009) – *Aproveitamento e Valorização das Águas Termiais dos Açores: Presente e Futuro*. Encontro Internacional de Termalismo e Turismo Termal & III Fórum Ibérico de Águas Engarrafadas e Termalismo: Termalismo e Águas Engarrafadas – Perspectiva Pluridisciplinar. INOVA, Ponta Delgada – Açores, pp. 5-10.

QUEIROZ, G., GASPAR, J.L., COLE, P.D., GUEST, J.E., WALLENSTEIN, N., DUNCAN, A.M. & PACHECO, J. (1995). *Erupções vulcânicas no vale das Furnas (ilha de S. Miguel, Açores) na primeira metade do século XV*. Açoreana, 8(1): 159-165.

SECRETARIA REGIONAL DO AMBIENTE E DO MAR [SRAM], (2010) - *Plano de Ordenamento da Bacia Hidrográfica da Lagoa das Furnas*.

SECRETARIA REGIONAL DO AMBIENTE E DO MAR [SRAM], (2012) - *Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores RH9, Relatório Técnico, Capítulo 2, Volume 2: Plano de Gestão de Recursos Hídricos da Ilha de São Miguel, Caracterização e diagnóstico da situação de referência*. Governo Regional dos Açores. 698 pp.

SECRETARIA REGIONAL DA AGRICULTURA E DO AMBIENTE/ DIREÇÃO REGIONAL DO AMBIENTE [SRAA/DRA], (2015) – *Plano de Gestão da Região Hidrográfica dos Açores (RH9) 2016-2021. Capítulo 2, Volume 2 – São Miguel: Caracterização e diagnóstico da situação de referência*. Governo Regional dos Açores. 529 pp.

VICINI, L. (2005) – *Análise multivariada da teoria à prática*. Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria. 215 pp.

VIVEIROS, F., CARDELLINI, C; FERREIRA, T., CALIRO, S., CHIODINI, G. & SILVA, C. (2010) - *Soil CO₂ emissions at Furnas volcano, São Miguel Island, Azores archipelago; Volcano monitoring perspectives, geomorphologic studies, and land use planning application*. Journal of Geophysical Research, Vol. 115, B12208. 17 pp.

WALLENSTEIN, N., NUNES, J.C. & FORJAZ, V.H. (1988) – *Variação da temperatura nos campos fumarólicos das Furnas em 1987*. Centro de Vulcanologia INIC e Departamento de Geociências – Universidade dos Açores. U.5 – Unidade de Vulcanologia Aplicada. Documento Interno nº7. Ponta Delgada. 22 pp.

ZBYSZEWSKI, G., ALMEIDA, F. M., FERREIRA, O.V., & ASSUNÇÃO, C.T. (1958), *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 - Notícia Explicativa da folha B da Ilha de S. Miguel (Açores)*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 22 pp.

ZBYSZEWSKI, G., FERREIRA, O.V. & ASSUNÇÃO, C.T. (1959) - *Carta Geológica de Portugal na escala 1:50000 - Notícia Explicativa da folha A da Ilha de S. Miguel (Açores)*. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa, 22 pp.

<http://www.cvarg.azores.gov.pt/geologia-acoressao-miguel/Paginas/GA-SMiguel-Vulcanismo-Secundario.aspx>

11. ANEXOS

ANEXO 1 – LOCALIZAÇÕES GEOGRÁFICAS E REGISTOS FOTOGRÁFICOS DAS NASCENTES E FUMAROLAS DA “CONCESSÃO HIDROMINERAL DA ESTÂNCIA TERMAL DAS FURNAS.

Quadro 11.1 - Listagem das fumarolas e nascentes mencionadas nos documentos da concessão de 1964.

FUMAROLAS E NASCENTES LOCALIZADAS DENTRO DA ÁREA DE CONCESSÃO	
REFERÊNCIA NA LEGENDA DO MAPA 1/2000	DESIGNAÇÃO
Fumarolas	
C1	Caldeira Grande
C2; C2';C2'';C2'''	Caldeiras Secas
C3	Caldeira do Asmodeu
C4	Caldeira de Pero Botelho ou das Lamas
C5	Caldeira do Esguicho
C6	Caldeira dos Vimes
C7	Caldeirão do Chalet
Nascentes localizadas na zona de proteção A	
1; 1';1''	Nascentes do Rego
2; 2'	Nascentes das Três Bicas
3; 3'; 3''	Nascentes das Quenturas
4	Nascente da Encosta
5	Nascente da Grutinha I ou Ernesto Correia
6	Nascente da Grutinha II
7	Nascente do Torno
8	Nascente da Morangueira
9; 9'	Nascentes do Poço
10; 10'	Nascentes da Água da Prata
11	Nascente de Miguel Henriques
12	Nascente do Chalet Frio
13	Nascente da Água Azeda do Rebentão
14	Nascente de Pimentel e Castro
15	Nascente da Bica da Água Santa
16	Nascente da Água Azeda
17	Nascente do Padre José
Nascentes localizadas na zona de proteção B	
20	Nascente da Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação
20'	Nascente do Poço da Água Férrea
21	Nascente do Dr. José Bruno
Nascentes localizadas no interior da área de concessão mas excluídas da mesma por não serem consideradas mineromedicinais	
22	Nascente da Fonte da Camarça
23	Nascente da Água da Helena
NASCENTES LOCALIZADAS FORA DA ÁREA DE CONCESSÃO E MENCIONADAS NOS DOCUMENTOS ORIGINAIS	
18	Nascente da Serra do Trigo
19	Nascente da Água do Vale de Alcântara
24	Nascente do Cabaço
25	Nascente da Ribeira de Nossa Senhora
26	Nascente do Sanguinhal



Figura 11.1 - Aspeto atual da nascente Dr. José Bruno (21) ou Água Peideira e respetiva placa de identificação.



Figura 11.2 – Nascente Grutinha I ou Ernesto Correia (5).



Figura 11.3 – Nascente do Torno (7).



Figura 11.4 – Nascente da Grutinha II (6). As setas indicam as três bicas distintas.



Figura 11.5 – Nascente do Poço (9) ou "Poça da Tia Silvina" ou Pocinha.



Figura 11.6 - Aspeto atual da Nascente da Morangueira (8).



Figura 11.7 - Aspecto atual da captação da nascente das Qenturas (3) ou Água Férrea das Qenturas, conforme indica a placa junto à seta.



Figura 11.8 - A seta de maiores dimensões indica a nascente do Rego (1), canalizada após as obras de embelezamento e as setas de menores de dimensões indicam o talude onde ocorrem outras emergências desta nascente.



Figura 11.9 - Exemplo de uma escorrência ocasional no talude das nascentes do Rego.



Figura 11.10 - Nascente Rego II, localizada nas escadas de acesso à nascente das Qenturas.



Figura 11.11 - Nascentes das Três Bicas (ou da Água das Quinturas), com indicação da Bica Direita (2), Bica Centro (2') e Bica Esquerda.



Figura 11.12 - Localizações de alguns pontos de escorrência (seta branca) no talude das Qenturas.

2 – Nascentes das Três Bicas

3 – Nascente das Qenturas (ou Água Férrea das Qenturas)

4 – Nascentes da Encosta

C – Caixa localizada no final do talude que coleta essas escorrências e as reencaminha para a ribeira adjacente.



Figura 11.13 – Nascente da Água Azeda do Rebentão (13).



Figura 11.14 – Nascente da Bica da Água Santa (15).

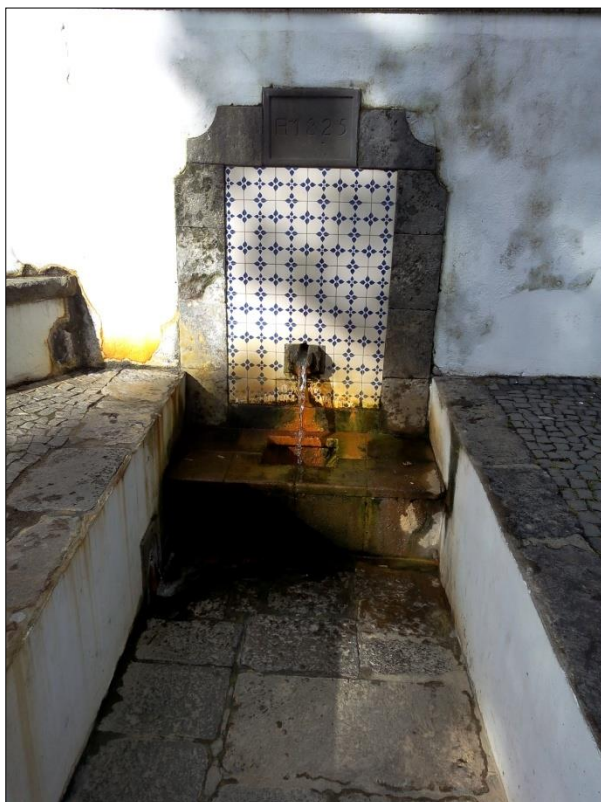


Figura 11.15 – Nascente da Água Azeda (16).



Figura 11.16 – Nascente de Pimentel e Castro ou Dr. Diniz (14).



Figura 11.17 - Nascentes Miguel Henriques (10), à esquerda e Água da Prata (11), à direita.



Figura 11.18 - Nascente do Chalet Frio (12), onde a seta indica o local da escorrência, pouco visível no registo fotográfico devido às condições do próprio local. O tracejado delimita um depósito de enxofre que ocorre na parede N da estrutura.



Figura 11.19 - Nascente do Chalet Frio-Banhos.



Figura 11.20 - Caldeira do Asmodeu (C3).



Figura 11.21 - Caldeira de Pero Botelho ou das Lamas (C4).

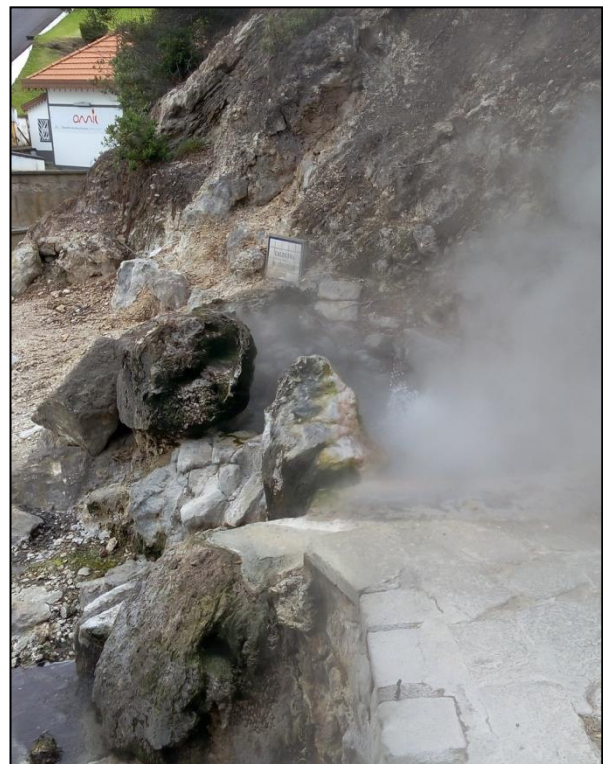


Figura 11.22 - Caldeira do Esguicho (C5).

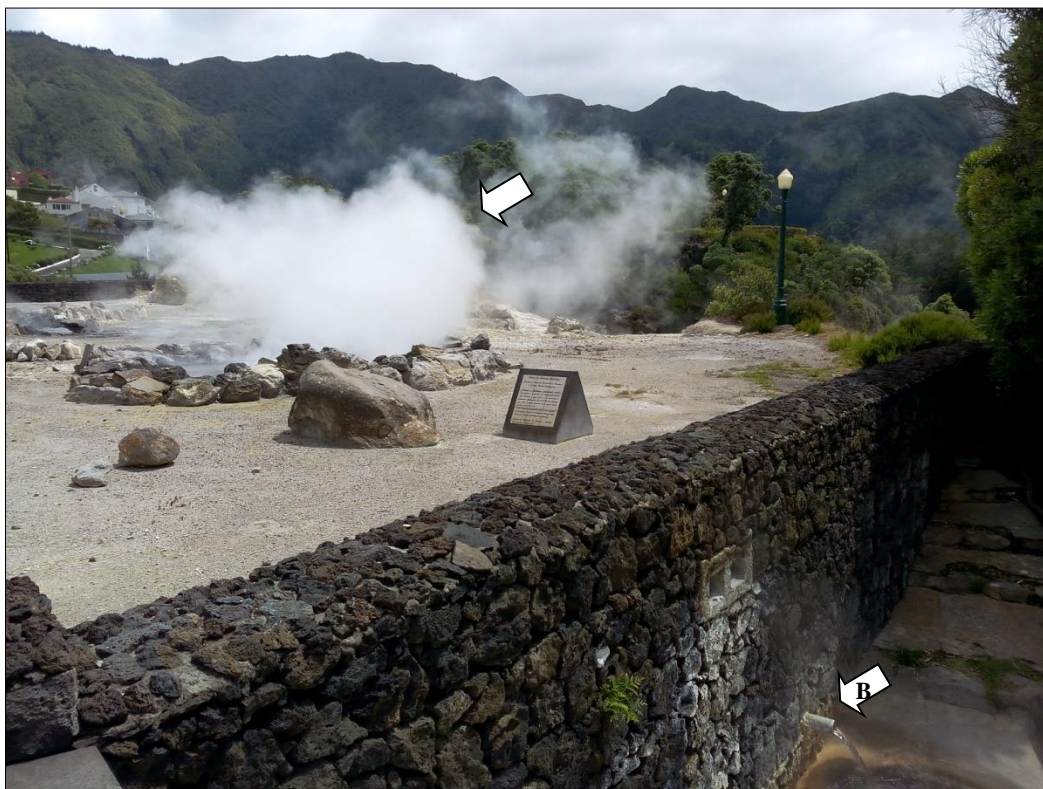


Figura 11.23 – Aspeto atual da Caldeira Grande (C1), onde a seta branca indica a localização da fumarola e a seta branca “B” a localização da bica onde emerge a água quente.



Figura 11.24 - Caldeirão do Chalet (C7) e respetiva bica (seta branca “B”).

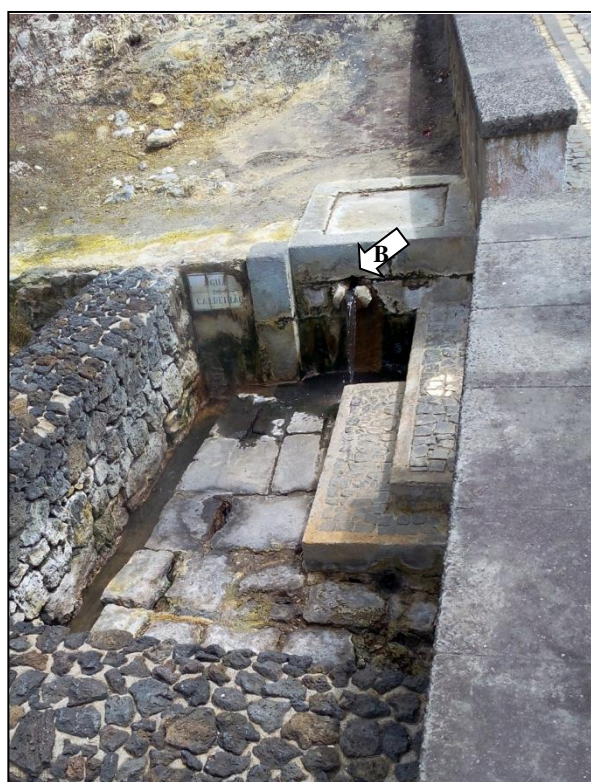


Figura 11.25 - Pormenor da localização da bica onde emerge a água quente do Caldeirão do Chalet.

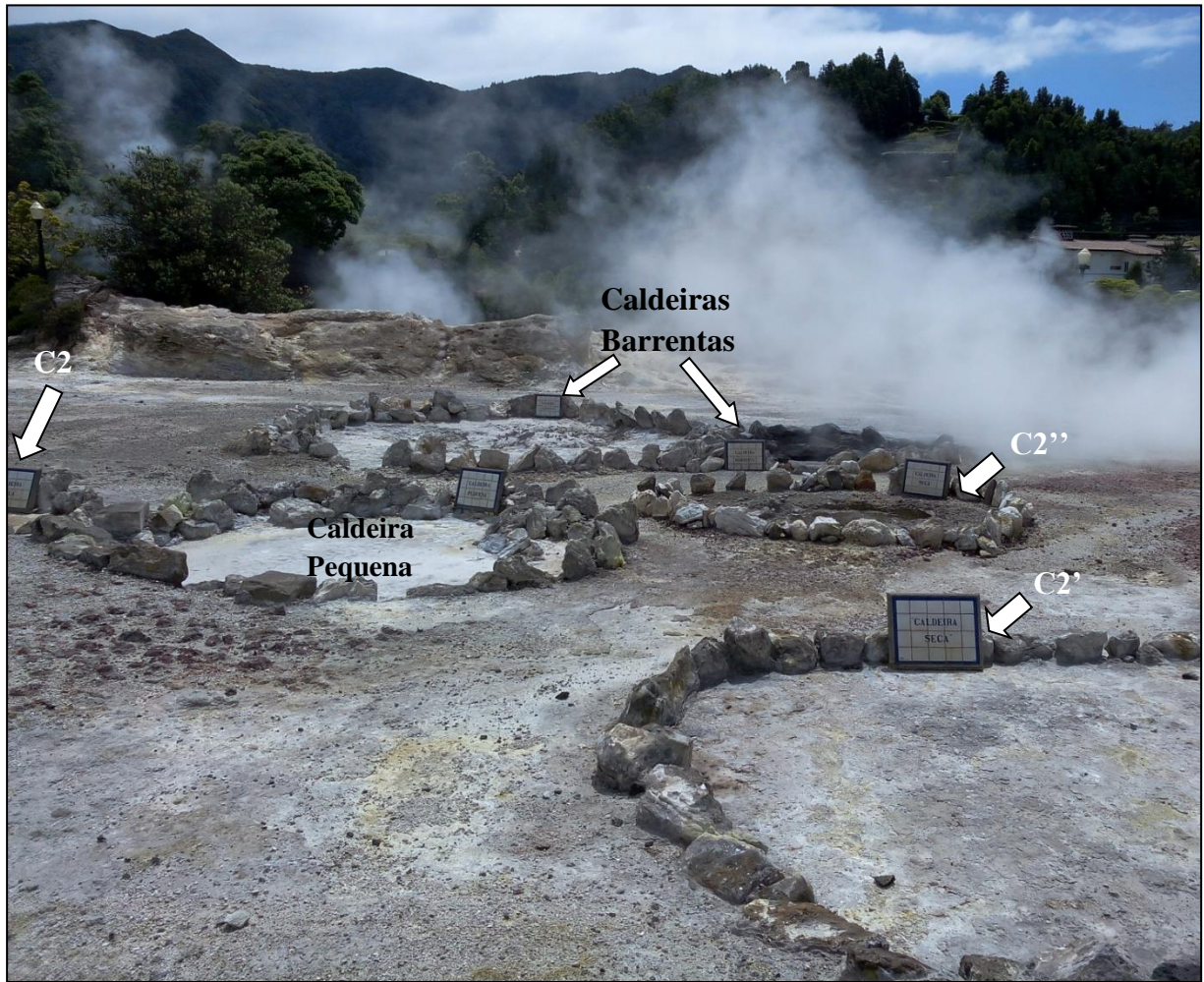


Figura 11.26 - Distribuição geográfica das Caldeiras Secas (C2, C2' e C2''), Caldeira Pequena e Caldeiras Barrentas.



Figura 11.27 - Caldeira dos Vimes (C6), com presença de uma fumarola de menores dimensões a NNO da mesma. As setas indicam os locais por onde se dá a escorrência e posterior entrada de água fria na Caldeira dos Vimes.

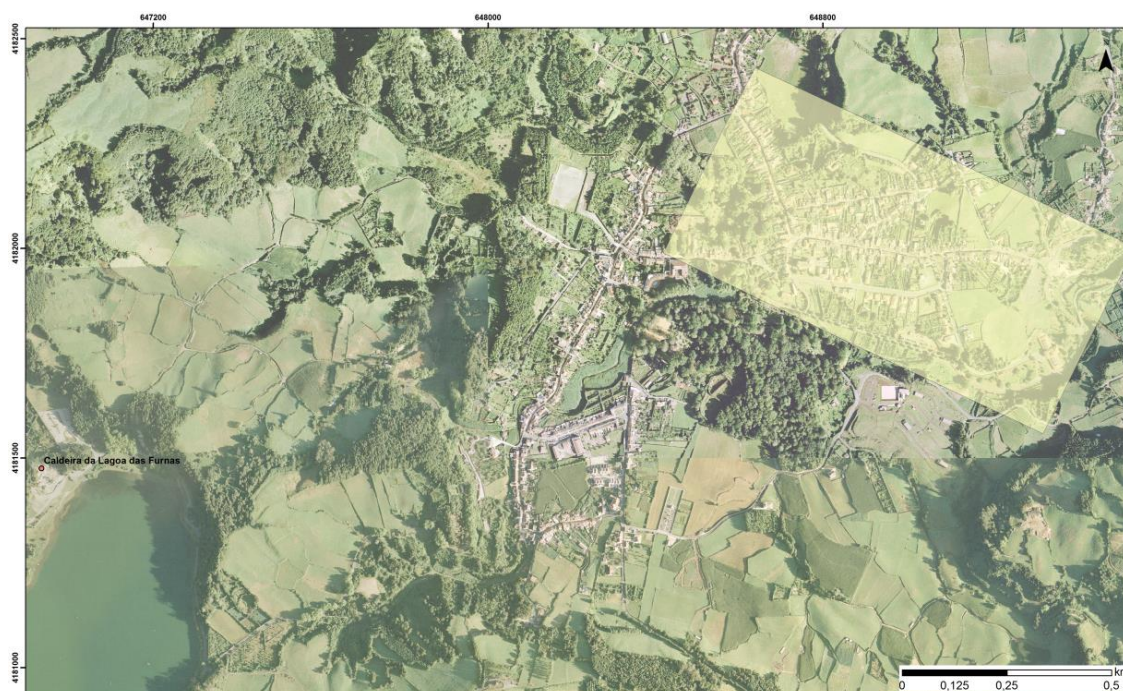


Figura 11.28 - Localização da fumarola da Caldeira da Lagoa das Furnas relativamente à área da concessão. A Lagoa das Furnas encontra-se a SE da fumarola (Base: Ortofoto SRCTE).



Figura 11.29 - Registo fotográfico do Campo Fumarólico da Lagoa das Furnas, com indicação (seta) da fumarola em questão.

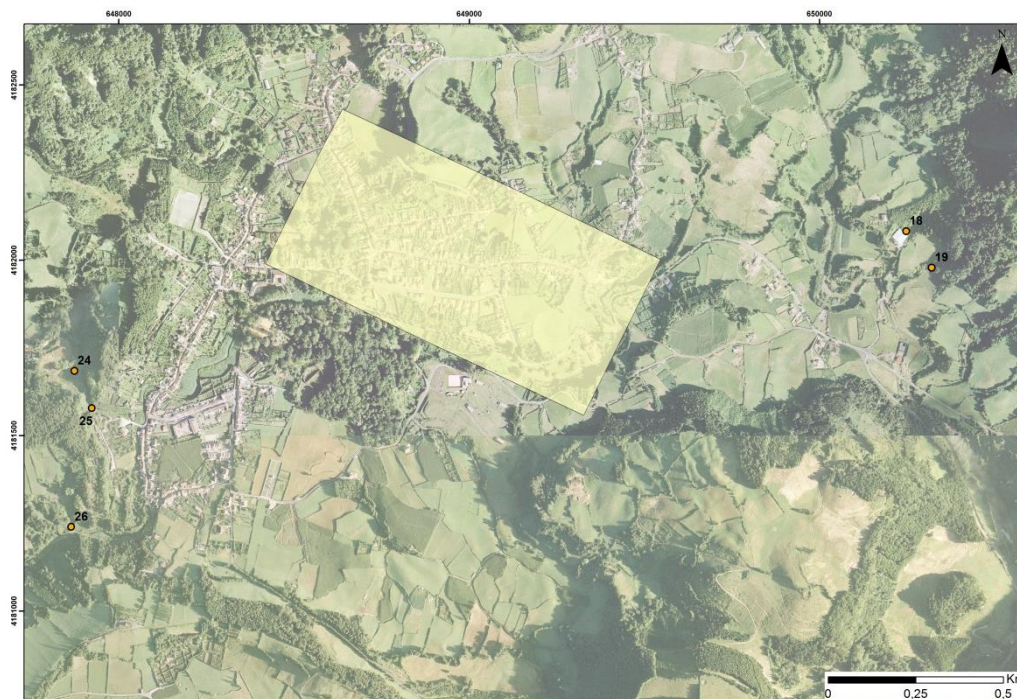


Figura 11.30 - Localização das nascentes exteriores à área de Concessão (18, 19, 24, 25 e 26) que são referidas em alguns documentos de 1964 (cf. Quadro 11.1). (Base: Ortofoto SRCTE)



Figura 11.31 - Aspeto atual da zona onde se encontrava a Nascente do Cabaço (vista de Oeste para Este) ocupada por inhames e por um pequeno curso de água canalizado no sentido da ribeira (seta) que atravessa a zona balnear da Poça da Dona Beija.



Figura 11.32 - Vista do túnel (de Sul para Norte) sob a estrada regional, com predominância de exurgências na parede esquerda do mesmo. Algumas exurgências foram canalizadas com recurso a tubos por forma a favorecer a escorrência, estando as principais indicadas com setas.

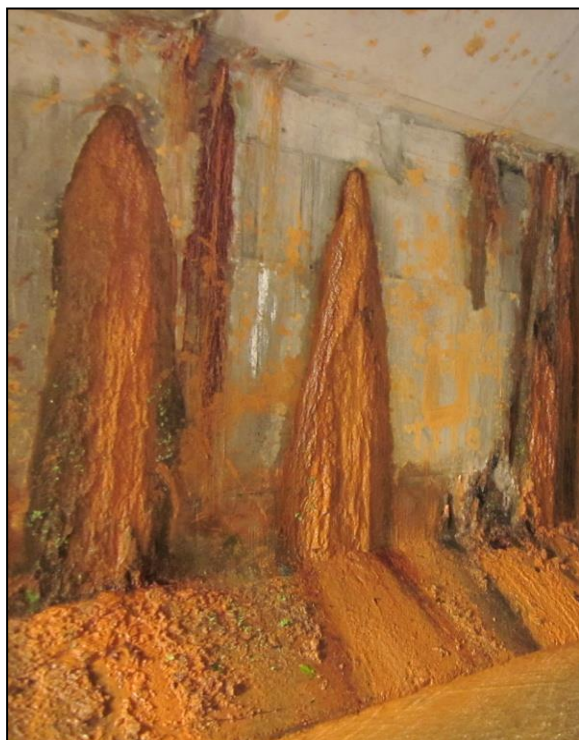


Figura 11.33 - Pormenor da parede esquerda do túnel, onde é visível a natureza férrea das exurgências.



Figura 11.34 - Pormenor da parede esquerda do túnel, onde algumas escorrências estão canalizadas com recurso a tubos, conforme indicado pelas setas.

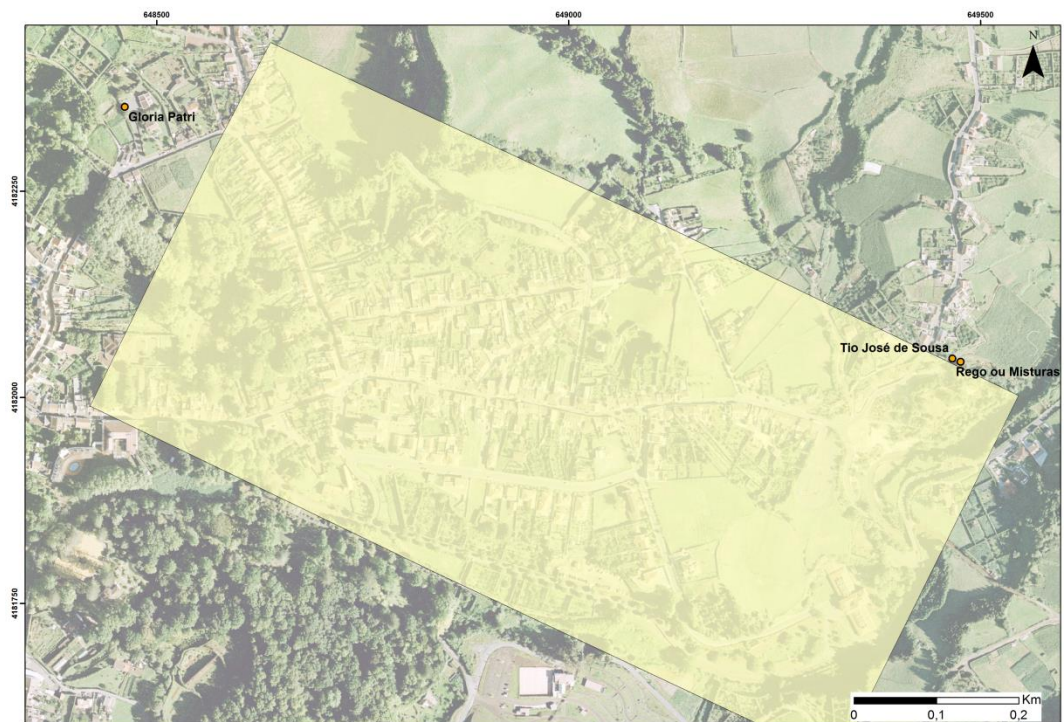


Figura 11.35 - Localização das nascentes Gloria Patri (bicas públicas), Tio José de Sousa e Água do Rego ou Misturas (Base: Ortofoto SRCTE).



Figura 11.36 - Aspeto atual das bicas públicas da nascente Gloria Patri, situadas na freguesia das Furnas.



Figura 11.37 - Aspeto atual da nascente Água do Rego ou Misturas.



Figura 11.38 - Registo fotográfico recente (2017) da nascente Tio José de Sousa. O tubo indicado pela seta não existia à data das campanhas de amostragem.

Quadro 11.2 - Listagem final de nascentes e fumarolas inventariadas na “Hidrópole das Furnas” tendo como ponto de partida os documentos da “Concessão Hidromineral da Estância Termal das Furnas”, de 1964.

REF. NA CONCESSÃO	DESIGNAÇÃO DA NASCENTE NOS DOCUMENTOS DA CONCESSÃO	OUTRAS DESIGNAÇÕES/ OBSERVAÇÕES	COORDENADAS UTM_FUSO 26 (WGS_84)		ALTITUDE	ÁREA DE CONCESSÃO
			M (m)	P (m)	(m)	
NASCENTES DA CONCESSÃO IDENTIFICADAS NO MAPA 1/2000, E MENCIONADAS NO RELATÓRIO DE DEMARCAÇÃO DE 1964						
1'	Rego		649291,24	4181742,98	187,5	Integra
2	Três Bicas - Direita		649298,12	4181750,72	188	Integra
2'	Três Bicas - Centro		649297,78	4181749,64	188	Integra
3	Quenturas	Férrea das Quenturas	649295,96	4181756,05	191	Integra
4	Encosta - Direita		649308,01	4181788,99	194	Integra
5	Grutinha I ou Ernesto Correia		649279,09	4181724,46	187	Integra
6	Grutinha II		649262,88	4181716,75	187	Integra
7	Torno		649136,99	4181692,02	187	Integra
8	Morangueira		649100,22	4181727,08	187	Integra
9	Poço	Pocinha ou Poça da Tia Silvina	649368,38	4182015,73	191	Integra
10	Miguel Henriques		649369,45	4182016,17	191	Integra
11	Água da Prata		649136,99	4181692,02	187	Integra
12	Chalet Frio		649378,78	4182027,63	192	Integra
13	Água Azeda do Rebentão		649412,71	4182032,25	193	Integra
14	Pimentel e Castro	Dr. Diniz	649410,80	4182029,64	191	Integra
15	Bica da Água Santa		649410,13	4182016,48	189	Integra
16	Água Azeda		649451,95	4182037,05	188	Integra
17	Padre José		649341,99	4181896,98	192	Integra
20	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação	Banhos Férreos ou Banhos Velhos	648694,23	4181941,55	194	Integra
20'	Poço da Água Férrea		Localização desconhecida			Integra
21	Dr. José Bruno	Água Peideira	648678,02	4181949,06	194	Integra
NASCENTES ORIGINAIS DA CONCESSÃO IDENTIFICADAS NO MAPA 1/2000, MAS NÃO MENCIONADAS NO RELATÓRIO DE DEMARCAÇÃO DE 1964						
18	Serra do Trigo		650247,39	4182083,05	198	Não integra
19	Água do Vale de Alcântara	Dr. Frederico	650319,99	4181978,98	195	Não integra
22	Fonte da Camarça	Não considerada minero-medicinal (1964)	648599,95	4182143,04	197	Integra
23	Água da Helena	Não considerada minero-medicinal (1964)	648694,46	4182288,44	202	Integra
24	Cabaço ¹	Banhos Cabaços	647873	4181685	226,5	Não integra

25	Ribeira de Nossa Senhora	Terra Nostra I	647922,83	4181578,41	210	Não integra
26	Sanguinhal		647864,02	4181240,02	230	Não integra
¹ Coordenadas da base de dados HYDROVULC, in FREIRE (2006)						
NASCENTES ATUAIS NÃO MENCIONADAS NOS DOCUMENTOS DA CONCESSÃO						
	Encosta - Esquerda		649304,99	4181781,99	194	Integra
	Três Bicas - Esquerda		649297,13	4181749,06	188	Integra
	Chalet Frio - Banhos		649420,05	4182030,56	192	Integra
	Padre José (casa de chá)		649343,83	4181885,76	192	Integra
	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação II	Banhos Férreos ou Banhos Velhos II	648696,01	4181937,68	194	Integra
	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação III	Banhos Férreos ou Banhos Velhos III	648697,04	4181935,14	194	Integra
	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação IV	Banhos Férreos ou Banhos Velhos IV	648693,51	4181958,32	194	Integra
	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação V	Banhos Férreos ou Banhos Velhos V	648691,93	4181960,70	194	Integra
	Rego II		649294,15	4181746,36	188	Integra
	Água do Rego	ou Misturas	649475,78	4182043,14	186	Não integra
	Tio José de Sousa		649465,99	4182047,09	193	Não integra
	Gloria Patri		648311,22	4182483,89	217	Não integra
	Poça da Dona Beija	Terra Nostra II	647934,47	4181569,42	210	Não integra
	Ribeira de Nossa Senhora II		647921,46	4181582,89	208	Não integra
	Ribeira de Nossa Senhora III		647919,35	4181586,28	208	Não integra
	Ribeira de Nossa Senhora IV		647923,79	4181586,28	208	Não integra
FUMAROLAS ORIGINAIS DA CONCESSÃO IDENTIFICADAS NO MAPA 1/2000, E MENCIONADAS NO RELATÓRIO DE DEMARCAÇÃO DE 1964						
C1	Caldeira Grande		649355,71	4181942,06	197	Integra
C3	Caldeira do Asmodeu		649387,14	4181958,21	195	Integra
C4	Caldeira de Pero Botelho ou das Lamas		649407,99	4181972,6	195	Integra
C5	Caldeira do Esguicho		649410,95	4181999,54	191	Integra
C6	Caldeira dos Vimes		649457,43	4182030,75	186	Integra
C7	Caldeirão do Chalet		649406,30	4182025,30	190	Integra

FUMAROLAS IDENTIFICADAS NO MAPA 1/2000, MAS NÃO MENCIONADAS NO RELATÓRIO DE DEMARCAÇÃO DE 1964						
C2	Caldeiras Secas		649350,52	4181960,22	198	Integra
C2'	Caldeiras Secas		649344,28	4181953,24	198	Integra
C2''	Caldeiras Secas		649350,84	4181952,60	198	Integra
FUMAROLAS ATUAIS NÃO MENCIONADAS NOS DOCUMENTOS DA CONCESSÃO						
	Caldeiras Barrentas		649357,51	4181953,77	198	Integra
	Caldeira Pequena		649349,57	4181956,94	198	Integra
	Caldeira da Lagoa das Furnas		646932,41	4181475,19	283	Não Integra

ANEXO 2 – PONTOS DE AMOSTRAGEM E METODOLOGIA

Quadro 11.3 - Listagem dos pontos amostrados/inventariados.

Amostra	Nascente	Outras designações	Referência na Concessão	Referência PGRHI 2016-2020	Coordenadas WGS_84		Altitude (m)
					M	P	
1	Água Azeda do Rebentão		13	SMG.886	649412,71	4182032,25	193
2	Água Azeda		16	SMG.902	649451,95	4182037,05	188
3	Caldeirão do Chalet		C7	SMG.885	649406,3	4182025,3	190
4	Miguel Henriques		10	SMG.895	649368,38	4182015,73	191
5	Quenturas	ou Férrea das Quenturas	3	SMG.894	649295,96	4181756,05	191
6	Chalet Frio - Banhos		-	SMG.899	649420,05	4182030,56	192
7	Padre José		17	SMG.896	649341,99	4181896,98	192
8	Água da Prata		11	-	649369,45	4182016,17	191
9	Bica da Água Santa		15	SMG.900	649410,13	4182016,48	189
10	Água Férrea I	ou Banhos CP ⁴ / Férreos/ Velhos	20	-	648694,23	4181941,55	194
11	Chalet Frio		12	SMG.897	649378,78	4182027,63	192
12	Caldeira Grande		C1	SMG.905	649355,71	4181942,06	197
13	Pimentel e Castro	ou Dr. Diniz	14	SMG.893	649410,80	4182029,64	191
14	Dr. José Bruno	ou Água Peideira	21	SMG.892	648678,02	4181949,06	194
15	Gloria Patri ¹		-	-	648461,50	4182352,53	205
16	Grutinha I		5	SMG.916	649279,09	4181724,46	187
17	Grutinha II	ou Ernesto Correia	6	SMG.917	649262,88	4181716,75	187
18	Lagoa das Furnas 1		-	-	647003,00	4181421,00	281
19	Lagoa das Furnas 2		-	-	647372,00	4179545,00	287
20	Morangueira		8	SMG.920	649136,99	4181692,02	187
21	Torno		7	SMG.937	649243,09	4181706,87	187
22	Rego		1	-	649291,24	4181742,98	187,5
23	Três Bicas - Centro	ou Quenturas	2'	SMG.925	649297,78	4181749,64	188
24	Três Bicas - Direita	ou Quenturas	2	SMG.923	649298,12	4181750,72	188
25	Três Bicas - Esquerda	ou Quenturas	-	SMG.924	649297,13	4181749,06	188
26	Ribeira de Nossa Senhora	Terra Nostra I	-	SMG.934	647922,83	4181578,41	210
27	Poça da Dona Beija	Terra Nostra II	25	SMG.935	647934,47	4181569,42	210
28	Fonte da Camarça		22	SMG.887	648599,95	4182143,04	197
29	Poço		9	SMG.888	649100,22	4181727,08	187
30	Encosta - Direita		4	-	649308,01	4181788,99	194
31	Encosta - Esquerda		-	-	649304,99	4181781,99	194
32	Tio José de Sousa		-	SMG.936	649465,99	4182047,09	193
33	Água do Rego	ou Misturas	-	SMG.890	649475,78	4182043,14	186

34	Sanguinhal		26	-	647864,02	4181240,02	230
35	Água do Vale de Alcântara		19	SMG.901	650319,99	4181978,98	195
36	Padre José (casa de chá)		-	-	649343,83	4181885,76	192
37	Água da Helena		23	-	648694,46	4182288,44	202
38	Serra do Trigo		18	SMG.933	650247,39	4182083,05	198
39	Caldeira da Lagoa das Furnas		-	SMG.908	646932,41	4181475,19	283
40	Caldeira do Asmodeu		C3	SMG.903	649387,14	4181958,21	195
41	Caldeira do Esguicho		C5	SMG.904	649410,95	4181999,54	191
42	Caldeira dos Vimes		C6	SMG.907	649457,43	4182030,75	186
43	Caldeiras Barrentas		-	-	649357,51	4181953,77	198
44	Caldeira Pequena		-	-	649349,57	4181956,94	198
45	Caldeira de Pero Botelho	ou das Lamas	C4	-	649407,99	4181972,6	195
46	Caldeiras Secas 1		C2	-	649350,52	4181960,22	198
47	Caldeiras Secas 2		C2'	-	649344,28	4181953,24	198
48	Caldeiras Secas 3		C2''	-	649350,84	4181952,6	198
49	Água Férrea II	ou Banhos CP ⁴ / Férreos/ Velhos II	-	-	648696,01	4181937,68	194
50	Água Férrea III	ou Banhos CP ⁴ / Férreos/ Velhos II III	-	-	648697,04	4181935,14	194
51	Água Férrea IV	ou Banhos CP ⁴ / Férreos/ Velhos II IV	-	-	648693,51	4181958,32	194
52	Água Férrea V	ou Banhos CP ⁴ / Férreos/ Velhos II V	-	-	648691,93	4181960,70	194
53	Cabaço ²		24	-	647873,00	4181685,00	226,5
54	Cabaço II ³		-	-	647894,23	4181698,17	220
55	Ribeira de Nossa Senhora II		-	-	647921,46	4181582,89	208
56	Ribeira de Nossa Senhora III		-	-	647919,35	4181586,28	208
57	Ribeira de Nossa Senhora IV		-	-	647923,79	4181586,28	208
58	Poço da Água Férrea		20'	-	-	-	-
59	Rego II		-	-	649294,15	4181746,36	188

¹ - Coordenadas correspondem às bicas públicas da Gloria Patri, onde foi efetuada a amostragem.

² - Coordenadas da base de dados HYDROVULC, *in* FREIRE (2006).

³ - Coordenadas de amostra colhida no interior do túnel com exurgências férreas mencionado no capítulo 4, para futura comparação com dados de análises históricas da Nascente do Cabaço.

⁴ - Banhos CP – Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos/Banhos Velhos.

Quadro 11.4 - Listagem de parâmetros de interesse analisados no INOVA e respectivos métodos analíticos e limites de quantificação.

Parâmetro	Método	Limite de Quantificação
Alcalinidade (Bicarbonato)	NP 421:1966 - Volumetria	3 mg HCO ₃ /L
Alcalinidade (Total)	NP 421:1966 - Volumetria	4 mg CaCO ₃ /L
Amônio	SMEWW 4500-NH ₃ F:2012 - EAM (VIS)	0,08 mg NH ₄ /L
Arsénio	SMEWW 3113 B:2012 - EAA (FG)	3 µg As/L
Cálcio	SMEWW 3111 B:2012 - EAA (CH)	0,05 mg Ca/L
Cloreto	PT 60 (2013-02) - Cl	9 mg Cl/L
Dióxido de carbono livre	NP 421:1966 - Volumetria	5 mg/L
Dureza total	SMEWW 2340 B:2012 - Cálculo	-
Ferro	PT 37 (2007-12) - EAA (CH)	0,08 mg Fe/L
Fluoreto	PT 60 (2013-02) - Cl	0,2 mg F/L
Magnésio	SMEWW 3111 B:2012 - EAA (CH)	0,05 mg Mg/L
Nitrato	PT 60 (2013-02) - Cl	0,3 mg NO ₃ /L
Nitrito	PT 60 (2013-02) - Cl	0,1mg NO ₂ /L
Oxidabilidade meio ácido	NP 731:1969 - Volumetria	2 mg O ₂ /L
Potássio	SMEWW 3111 B:2012 - EAA (CH)	0,05 mg K/L
Resíduo Total	NP 505:1967 - Gravimetria	2 mg/L
Sílica	NP 439:1966 - EAM (VIS)	2,14 mg SiO ₂ /L
Sódio	SMEWW 3111 B:2012 - EAA (CH)	0,05 mg Na/L
Sulfato	PT 60 (2013-02) - Cl	1,0 mg SO ₄ /L
Sulfureto de Hidrogénio	SMEWW 4500 S ₂ - F:2012 -Volumetria	0,5 mg H ₂ S/L



Figura 11.39 - Dispositivo para colheita de águas de precipitação, devidamente etiquetado (Amostra 1 – SC: Salto do Cavalo).



Figura 11.40 - Exemplo de instalação do dispositivo de colheita de águas de precipitação (Amostra 4 – FBH).

**ANEXO 3 – RESULTADOS DOS PARÂMETROS DE CAMPO E DAS DETERMINAÇÕES
ANALÍTICAS DE ELEMENTOS MAIORES, MENORES E EM TRAÇO**

Quadro 11.5 - Resultados das determinações analíticas de campo, de SiO₂ e H₂S.

ID Amostra	Nascente	Temperatura da água	pH	Condutividade eléctrica	Eh	CO ₂ livre	CO ₂ Total	Alcalinidade total	Mineralização total	Sílica	Sulfureto de hidrogénio
		°C		µS/cm	mV	mg CO ₂ /L	mg CO ₂ /L	mg CaCO ₃ /L	mg/L	mg SiO ₂ /L	mg H ₂ S/L
AM-01	Água Azeda do Rebentão	16,0	5,02	310	168,9	1292,3	1377,7	97	319,3	95,8	0,5
AM-02	Água Azeda	16,6	4,80	309	47,0	1335,4	1423,4	100	332,0	105	3,1
AM-03	Caldeirão do Chalet ¹	78,2	6,49	488	-8,9	133,5	280,5	167	539,7	180	1,3
AM-04	Miguel Henriques	21,0	5,25	399	23,3	844,3	963,1	135	406,7	95,6	0,6
AM-05	Quenturas	58,5	6,60	1400	-19,3	310,2	891,0	660	1353,0	150	0,5
AM-06	Chalet Frio - Banhos	17,0	4,92	348	44,4	1033,8	1108,6	85	337,7	99,8	2,1
AM-07	Padre José	58,3	6,20	746	33,7	206,8	399,5	219	710,2	192	0,5
AM-08	Água da Prata	23,9	4,98	365	53,2	1163,1	1239,7	87	376,1	98,6	4,7
AM-09	Bica da Água Santa	96,2	7,60	715	-66,2	16,3	234,5	248	649,6	104	3,4
AM-10	Água Férrea I	39,0	6,10	1660	-56,6	646,1	1412,6	871	1722,6	162	0,5
AM-11	Chalet Frio	17,5	4,97	419	44,4	808,0	874,9	76	347,7	100	2,2
AM-12	Caldeira Grande ¹	92,0	7,88	2270	-253,0	3,8	490,0	552	1749,0	187	8,7
AM-13	Pimentel e Castro	16,5	5,15	314	110,3	1249,2	1337,2	100	334,0	99,9	1,3
AM-14	Dr. José Bruno	20,7	5,81	595	116,1	344,6	584,0	272	606,8	91,5	0,5
AM-15	Gloria Patri ¹	14,9	6,80	215	100,8	11,1	80,6	79	228,4	55,6	0,5
AM-16	Grutinha I	41,4	6,16	1483	3,2	611,8	1155,6	618	1359,0	136	0,5
AM-17	Grutinha II	43,6	5,98	1312	-3,0	620,3	1093,7	538	1244,4	166	0,5
AM-20	Morangueira	32,5	6,36	1632	-40,0	495,4	1109,6	698	1519,6	179	1,8
AM-21	Torno	40,0	6,16	1482	-23,3	482,5	1026,3	618	1361,0	155	0,5
AM-22	Rego	56,9	6,25	1264	-51,3	327,4	862,4	608	1323,8	203	0,5
AM-23	Três Bicas - Centro	56,3	6,38	1401	-54,6	370,5	905,5	608	1431,8	255	0,5
AM-24	Três Bicas - Direita	57,3	6,41	1418	-14,5	344,6	888,5	618	1296,0	164	0,5
AM-25	Três Bicas - Esquerda	18,9	6,75	228	100,2	10,5	77,4	76	241,7	73,1	0,5

AM-26	Ribeira de Nossa Senhora	41,7	5,65	529	-40,6	404,9	565,1	182	521,0	105	0,5
AM-27	Poça da Dona Beija	38,9	5,58	532	-35,8	396,3	552,1	177	511,9	97,7	0,5
AM-28	Fonte da Camarça	14,6	6,65	191	115,7	8,4	73,5	74	222,3	58,7	0,9
AM-29	Poço	47,1	6,20	1565	-64,3	430,8	1036,2	688	1465,4	180	0,5
AM-30	Encosta - Direita	60,0	6,28	1316	-51,2	180,9	737,1	632	1310,0	142	0,5
AM-31	Encosta - Esquerda	60,0	6,38	1310	-	323,1	392,6	589	1278,0	209	-
AM-32	Tio José de Sousa	15,9	5,12	320	131,5	482,5	559,9	88	302,4	95,8	0,5
AM-33	Água do Rego	16,7	5,01	321	150,1	1120,0	1196,6	87	330,1	99,30	0,5
AM-34	Sanguinhal	35,8	5,52	541	28,0	473,8	685,0	240	607,8	149,00	0,5
AM-35	Água do Vale de Alcântara	18,0	5,43	363	162,8	689,2	818,6	147	367,3	82,40	-
AM-36	Padre José (casa de chá)	56,0	6,13	716	64,4	260,0	488,7	260	799,0	194,00	0,5
AM-39	Caldeira da Lagoa das Furnas	94,0	3,13	991	304,0	172,3	175,2	3	879,0	248,00	13
AM-40	Caldeira do Asmodeu	88,0	7,31	2510	-239,0	47,6	485,4	498	2149,0	187,00	3,8
AM-41	Caldeira do Esguicho	93,0	7,95	1870	-204,0	7,9	450,1	613	1485,0	171,00	5,2
AM-42	Caldeira dos Vimes	31,0	5,38	335	-130,5	385,1	454,3	79	317,0	91,90	2,7
AM-51	Água Férrea IV	35,6	6,02	1100	-	650,0	1393,0	845	1517,0	85,5	-
AM-52	Água Férrea V	30,0	5,73	1100	-	599,0	1110,4	576	1152,0	128	-
AM-54	Cabaço II	27,0	6,15	615	43,7	264,0	501,3	269	645,0	122	0,5
AM-55	Ribeira de Nossa Senhora II	42,0	6,02	558	22,9	358,0	528,2	194	548,0	112	0,5

¹ - Amostragem efetuada na bica (cf. Anexo 1, Fig.11.23, 11.25 e 11.36)

Quadro 11.6 - Resultados das determinações analíticas de elementos maiores: aniões e cátions.

ID Amostra	Nascente	Sódio	Potássio	Cálcio	Magnésio	Ferro	Amônio	Bicarbonato	Cloreto	Sulfato	Nitrato	Fluoreto
		mg Na/L	mg K/L	mg Ca/L	mg Mg/L	mg Fe/L	mg NH ₄ /L	mg HCO ₃ /L	mg Cl/L	mg SO ₄ /L	mg NO ₃ /L	mg F/L
AM-01	Água Azeda do Rebentão	33	15,7	10,3	3,4	5,5	0,08	118,3	14,9	21,5	0,3	1,3
AM-02	Água Azeda	33	16,8	10,6	3,8	5,2	0,08	122,0	14,8	20,3	0,3	1,1
AM-03	Caldeirão do Chalet ¹	80	18,3	9,6	3,1	0,9	0,22	203,7	31,2	7,7	0,3	2,4
AM-04	Miguel Henriques	54	25,8	11,7	2,7	4,7	0,08	164,7	15,6	28,0	2,6	1,5
AM-05	Quenturas	230	38,0	31,3	13,0	1,6	0,16	805,2	66,0	11,0	0,8	3,5
AM-06	Chalet Frio - Banhos	36	18,4	11,6	3,5	2,4	0,08	103,7	15,8	45,0	0,3	1,4
AM-07	Padre José	110	36,0	17,3	5,1	3,3	0,24	267,2	28,7	43,0	0,3	2,7
AM-08	Água da Prata	46	24,1	11,6	2,9	4,1	0,08	106,1	16,4	65,0	0,3	1,4
AM-09	Bica da Água Santa	140	16,0	5,1	0,7	0,1	0,48	302,6	58,0	21,3	0,3	5,0
AM-10	Água Férrea I	300	42,0	46,9	33,0	17,0	0,09	1062,6	50,0	7,9	0,3	2,2
AM-11	Chalet Frio	43	19,2	9,8	2,5	3,9	0,08	92,7	16,6	58,0	0,3	1,7
AM-12	Caldeira Grande ¹	580	24,1	1,3	0,1	0,1	0,12	674,0	270,0	58,0	0,3	12,0
AM-13	Pimentel e Castro	37	19,3	7,5	3,8	5,2	0,08	122,0	14,7	23,3	0,3	1,3
AM-14	Dr. José Bruno	80	23,0	25,8	11,0	0,1	0,08	331,8	29,7	9,0	0,3	1,3
AM-15	Gloria Patri ¹	26	12,0	6,8	4,8	0,1	0,08	96,4	14,7	5,4	6,2	0,5
AM-16	Grutinha I	290	30,0	36,8	13,0	4,8	0,09	754,0	79,0	12,7	1,1	5,0
AM-17	Grutinha II	260	31,0	30,2	11,0	5,5	0,13	656,4	69,0	12,3	1,6	4,0
AM-20	Morangueira	300	37,0	40,1	15,0	4,0	0,13	851,6	82,0	7,8	1,2	3,0
AM-21	Torno	280	25,7	25,7	13,0	6,6	0,09	754,0	80,0	10,9	0,6	5,0
AM-22	Rego	220	37,0	28,0	11,0	2,4	0,16	741,8	64,0	12,7	0,3	3,4
AM-23	Três Bicas - Centro	260	45,0	29,1	15,0	1,5	0,19	741,8	71,0	8,4	1,7	2,6
AM-24	Três Bicas - Direita	200	44,0	32,5	15,0	1,6	0,23	754,0	71,0	8,2	1,7	2,7
AM-25	Três Bicas - Esquerda	30	12,8	4,4	2,3	0,1	0,08	92,7	15,5	4,5	6,1	0,6
AM-26	Ribeira de Nossa Senhora	76	16,2	11,9	6,3	10,0	0,28	222,0	61,0	11,7	0,3	1,1

AM-27	Poça da Dona Beija	80	16,0	11,0	6,0	11,0	0,42	215,9	62,0	9,0	0,3	1,1
AM-28	Fonte da Camarça	30	10,5	3,8	4,6	0,1	0,08	90,3	13,7	4,4	5,3	0,9
AM-29	Poço	260	31,0	38,0	14,0	4,8	0,14	839,4	79,0	8,2	5,3	2,9
AM-30	Encosta - Direita	250	44,0	22,4	11,0	1,7	0,22	771,0	50,0	11,2	1,0	1,0
AM-31	Encosta - Esquerda	212	37,0	22,7	9,6	1,9	0,18	96,3	51,0	11,4	2,5	3,7
AM-32	Tio José de Sousa	37	17,6	7,3	3,4	4,7	0,08	107,4	14,5	12,0	1,6	1,2
AM-33	Água do Rego	47	19,5	7,3	3,3	0,5	0,08	106,1	16,7	28,5	1,5	1,2
AM-34	Sanguinhal	90	27,9	7,7	4,2	0,1	0,13	292,8	27,7	6,7	0,3	1,4
AM-35	Água do Vale de Alcântara	34	11,8	19,1	14,0	0,1	0,08	179,3	22,1	4,4	0,3	0,5
AM-36	Padre José (casa de chá)	150	36,0	13,4	5,1	3,7	0,23	317,0	29,7	44,0	0,3	3,6
AM-39	Caldeira da Lagoa das Furnas	100	22,9	20,1	5,3	6,7	6,00	4,0	13,5	450,0	2,6	1,2
AM-40	Caldeira do Asmodeu	580	24,1	0,9	5,0	0,1	0,30	607,0	243,0	490,0	0,3	12,0
AM-41	Caldeira do Esguicho	410	20,6	1,5	0,1	0,1	0,15	613,0	178,0	73,0	0,3	16,0
AM-42	Caldeira dos Vimes	42	19,0	6,0	3,2	5,4	0,08	96,0	18,2	35,1	0,3	0,7
AM-51	Água Férrea IV	230	38,0	45,2	29,0	6,4	0,08	1030,0	45,0	8,1	0,3	2,6
AM-52	Água Férrea V	150	31,0	31,8	21,0	7,9	0,08	709,0	38,0	8,9	24,1	2,6
AM-54	Cabaço II	90	23,6	18,5	16,0	9,2	0,08	329,0	29,2	11,0	0,3	1,4
AM-55	Ribeira de Nossa Senhora II	80	16,3	12,5	8,0	11,0	0,32	236,0	57,0	10,1	0,3	1,5

¹ - Amostragem efetuada na bica (cf. Anexo 1, Fig.11.23, 11.25 e 11.36)

Quadro 11.7 - Resultados das determinações analíticas de elementos menores e em traço.

ID Amostra	Nascente	Arsênio	Alumínio	Bário	Césio	Crômio	Cobre	Lítio	Manganês	Níquel	Chumbo	Rubídio	Estrôncio	Zinco
		µg/L												
AM-01	Água Azeda do Rebentão	3	918	1,3	0,14	5,0	2,0	10	629	3,0	3,14	37,5	28,0	59,3
AM-02	Água Azeda	3	880	0,6	0,15	3,0	1,0	6	632	2,0	0,73	45,3	26,2	36,3
AM-03	Caldeirão do Chalet ¹	46	188	2,0	4,80	0,5	0,2	40	994	0,3	0,50	80,1	24,1	7,3
AM-04	Miguel Henriques	3	654	0,7	0,22	3,0	1,0	16	878	2,3	0,36	50,6	22,8	21,3
AM-05	Quenturas	15	11	2,3	1,33	3,0	7,9	157	484	2,0	0,82	131,0	70,4	4,5
AM-06	Chalet Frio - Banhos	3	1120	1,5	0,14	3,0	1,0	9	779	2,0	0,52	43,0	28,2	20,9
AM-07	Padre José	3	20	1,5	0,64	5,0	2,0	64	1480	3,0	0,44	99,3	26,5	20,4
AM-08	Água da Prata	3	1190	1,3	0,16	5,0	2,0	10	627	3,8	0,14	44,4	25,4	13,1
AM-09	Bica da Água Santa	156	69	3,8	2,82	5,0	2,0	75	148	3,0	0,39	103,0	12,5	5,0
AM-10	Água Férrea I	40	49	1,8	0,59	5,0	2,0	168	519	3,0	0,17	109,0	91,3	5,0
AM-11	Chalet Frio	3	1030	1,2	0,18	5,0	2,0	10	639	3,8	0,10	44,2	25,0	12,3
AM-12	Caldeira Grande ¹	1590	161	1,6	11,90	5,0	2,0	307	29,4	3,0	0,10	206,0	25,6	5,0
AM-13	Pimentel e Castro	3	906	0,8	0,13	3,0	1,0	7	598	2,0	0,05	37,9	23,8	17,7
AM-14	Dr. José Bruno	3	32	0,3	0,14	0,5	1,3	25	22,2	0,2	0,03	49,7	37,6	23,2
AM-15	Gloria Patri ¹	3	6	1,0	0,03	0,5	1,8	2	2,5	0,3	0,74	17,9	24,7	3,5
AM-16	Grutinha I	48	104	1,6	0,98	5,0	2,0	214	775	3,0	0,61	116,0	76,1	5,4
AM-17	Grutinha II	49	63	1,5	0,96	1,0	0,4	151	845	0,6	3,75	102,0	63,6	5,9
AM-20	Morangueira	64	20	3,4	1,87	5,0	2,0	250	545	3,0	0,05	126,0	95,3	5,0
AM-21	Torno	55	172	1,2	0,91	1,2	1,1	194	891	0,3	0,13	106,0	52,6	66,4
AM-22	Rego	15	20	2,1	1,07	5,0	2,0	124	604	3,0	0,17	115,0	63,0	12,2
AM-23	Três Bicas - Centro	18	8	2,1	1,31	1,1	0,4	162	504	0,6	0,31	137,0	77,3	3,7
AM-24	Três Bicas - Direita	3	6	2,1	1,37	1,3	1,5	173	474	0,6	0,02	131,0	74,7	3,9
AM-25	Três Bicas - Esquerda	3	21	1,0	0,01	5,0	2,2	10	4,2	3,0	0,24	16,5	10,1	10,3
AM-26	Ribeira de Nossa Senhora	29	18	5,1	2,56	1,0	0,4	37	846	0,6	0,19	47,7	40,2	10,6
AM-27	Poça da Dona Beija	37	21	5,3	2,22	1,0	0,5	34	792	0,6	0,20	42,6	43,8	9,1

AM-28	Fonte da Camarça	3	20	1,0	0,04	5,0	2,0	10	1,7	3,0	0,85	16,2	17,5	6,0
AM-29	Poço	48	14	3,2	1,68	1,0	2,1	215	619	0,6	0,14	134,0	103,0	3,9
AM-30	Encosta - Direita	3	24	1,9	1,43	5,0	2,0	124	502	6,2	1,03	129,0	61,7	29
AM-31	Encosta - Esquerda	3												
AM-32	Tio José de Sousa	3												
AM-33	Água do Rego	3												
AM-34	Sanguinhal	3												
AM-35	Água do Vale de Alcântara	3												
AM-36	Padre José (casa de chá)	3												
AM-39	Caldeira da Lagoa das Furnas	3												
AM-40	Caldeira do Asmodeu	1170												
AM-41	Caldeira do Esguicho	563												
AM-42	Caldeira dos Vimes	3												
AM-51	Água Férrea IV	11												
AM-52	Água Férrea V	11												
AM-54	Cabaço II	8												
AM-55	Ribeira de Nossa Senhora II	25												

¹ - Amostragem efetuada na bica (cf. Anexo 1, Fig.11.23, 11.25 e 11.36)

ANEXO 4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Quadro 11.8 – Valores estatísticos obtidos para parâmetros físico-químicos e de campo.

	Máximo	Amostra	Mínimo	Amostra	Média	Mediana	Desvio Padrão
Temperatura (°C)	96,2	Bica da Água Santa	14,6	Fonte da Camarça	42,35	38,95	24,82
pH	7,95	Caldeira do Esguicho	3,13	C. Lagoa das Furnas	5,97	6,12	0,90
Condutividade (µs/cm)	2510	Caldeira do Asmodeu	191,2	Fonte da Camarça	894,17	665,00	603,16
Pot. redox (mV)	304	C. Lagoa das Furnas	-253	Caldeira Grande	13,14	22,90	110,42
CO₂ Livre (mg/L)	1335,40	Água Azeda	3,8	Caldeira Grande	474,17	390,70	373,17
CO₂ Total (mg/L)	1423,40	Água Azeda	73,50	Fonte da Camarça	762,37	777,81	398,44
Alcalinidade Total (mg/L)	871	Água Férrea I	3	C. Lagoa das Furnas	342,17	244,00	260,04
Mineralização Total (mg/L)	2149	Caldeira do Asmodeu	222,28	Fonte da Camarça	861,84	647,28	534,77

Quadro 11.9 - Valores estatísticos obtidos para componentes principais.

mg/L	Máximo	Amostra	Mínimo	Amostra	Média	Mediana	Desvio Padrão
Na	580	Caldeira Grande	26	Gloria Patri	157,52	95,00	139,74
K	45	Três Bicas - Centro	10,5	Fonte da Camarça	25,58	23,85	9,91
Ca	46,9	Água Férrea I	0,93	Caldeira do Asmodeu	17,74	12,20	12,65
Mg	33	Água Férrea I	0,05	Caldeira Grande	8,52	5,20	7,26
Fe	17	Água Férrea I	0,10	-	3,95	3,80	3,77
HCO₃	1062,6	Água Férrea I	4	C. Lagoa Furnas	399,54	279,99	314,58
SO₄	490	Caldeira do Asmodeu	4,4	Fonte da Camarça	41,42	11,55	98,73
Cl	270	Caldeira Grande	13,5	C. Lagoa Furnas	53,28	34,60	55,78
NO₃	24,1	Água Férrea V	0,3	-	1,78	0,30	3,89
F⁻	16	Caldeira do Esguicho	0,5	Água do Vale Alcântara/Gloria Patri	2,91	1,60	3,22
SiO₂	255	Três Bicas - Centro	55,6	Gloria Patri	135,86	125,00	49,58

(-) Diversas amostras com o valor mínimo referido.

Quadro 11.10 - Valores estatísticos obtidos para componentes vestigiais.

$\mu\text{g/L}$	Máximo	Amostra	Mínimo	Amostra	Média	Mediana	Desvio Padrão
Al	1190	Água da Prata	6	Gloria Patri	262,83	49,00	400,56
As	1590	Caldeira Grande	3	-	96,75	3,00	307,11
Ba	5,3	Poça da Dona Beija	0,3	Dr. José Bruno	1,90	1,55	1,24
Cr	5,0	-	0,5	-	3,18	3,00	1,88
Ce	11,9	Caldeira Grande	0,012	Três Bicas - Esquerda	1,42	0,93	2,33
Cu	7,9	Quenturas	0,2	Caldeirão do Chalet	1,71	2,00	1,38
Li	307	Caldeira Grande	2	Gloria Patri	93,00	52,00	90,72
Mn	1480	Padre José	1,7	Fonte da Camarça	566,57	611,50	348,35
Ni	6,2	Três Bicas - Direita	0,2	Dr. José Bruno	2,10	2,15	1,46
Pb	3,75	Grutinha II	0,02	Três Bicas - Direita	0,57	0,28	0,86
Rb	206	Caldeira Grande	16,2	Fonte da Camarça	82,78	89,70	47,86
Sr	103	Poço	10,1	Três Bicas - Esquerda	45,39	32,90	27,15
Zn	66,4	Torno	3,5	Gloria Patri	15,22	10,70	15,38

(-) Diversas amostras com o valor mínimo referido.

Quadro 11.11 – Matriz de correlação entre parâmetros físico-químicos e espécies dissolvidas na água.

	Temp. água	pH	CE	CO ₂ livre	CO ₂ total	Alcalin. Total	Min. Total
Temperatura água	1						
pH	0,475	1					
CE	0,665	0,537	1				
CO₂ livre	-0,608	-0,651	-0,366	1			
CO₂ total	-0,379	-0,347	0,109	0,829	1		
Alcalinidade Total	0,386	0,502	0,836	-0,220	0,336	1	
Mineralização Total	0,611	0,498	0,977	-0,328	0,188	0,911	1
Na	0,661	0,623	0,971	-0,385	0,058	0,766	0,931
K	0,312	0,167	0,602	-0,088	0,337	0,780	0,706
Ca	-0,016	-0,042	0,417	0,093	0,510	0,741	0,555
Mg	-0,088	0,039	0,370	0,042	0,451	0,711	0,524
Fe	-0,184	-0,350	-0,018	0,272	0,349	0,127	0,049
HCO₃	0,256	0,316	0,381	-0,173	0,026	0,340	0,409
SO₄	0,470	-0,161	0,336	-0,190	-0,232	-0,105	0,272
Cl	0,648	0,655	0,834	-0,411	-0,102	0,514	0,736
NO₃	-0,154	0,008	-0,007	-0,078	-0,026	0,085	0,019
F	0,676	0,651	0,751	-0,372	-0,121	0,449	0,649
SiO₂	0,710	0,157	0,679	-0,316	-0,053	0,500	0,676

Quadro 11.12 – Matriz de correlação entre espécies dissolvidas.

	Na	K	Ca	Mg	Fe	HCO ₃	SO ₄	Cl	NO ₃	F	SiO ₂
Na	1										
K	0,488	1									
Ca	0,259	0,729	1								
Mg	0,251	0,611	0,889	1							
Fe	-0,091	0,098	0,376	0,484	1						
HCO₃	0,464	0,096	-0,001	0,230	-0,009	1					
SO₄	0,331	-0,066	-0,212	-0,194	-0,070	0,204	1				
Cl	0,915	0,174	-0,066	-0,033	-0,174	0,497	0,365	1			
NO₃	-0,074	0,015	0,150	0,218	0,046	0,237	-0,063	-0,116	1		
F	0,831	0,118	-0,151	-0,141	-0,262	0,528	0,354	0,894	-0,103	1	
SiO₂	0,594	0,646	0,328	0,164	-0,031	0,054	0,371	0,429	-0,083	0,417	1

ANEXO 5 – RELAÇÃO ENTRE PARÂMETROS ANALISADOS

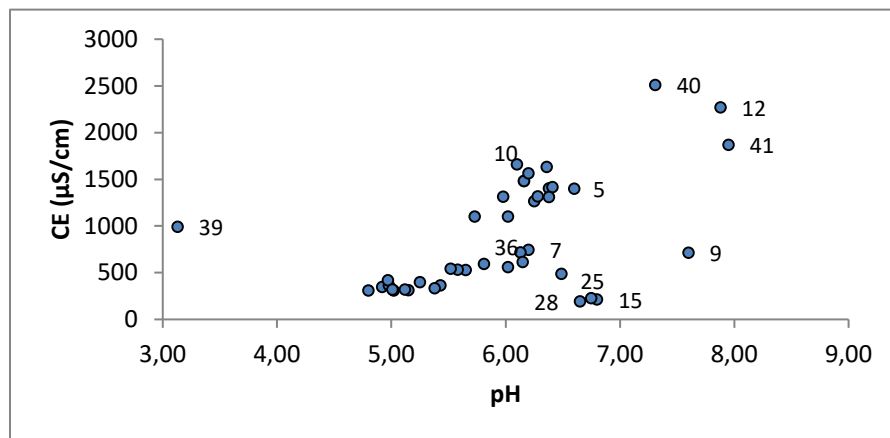


Figura 11.41 – Relação entre a Condutividade Elétrica (CE) e o pH das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

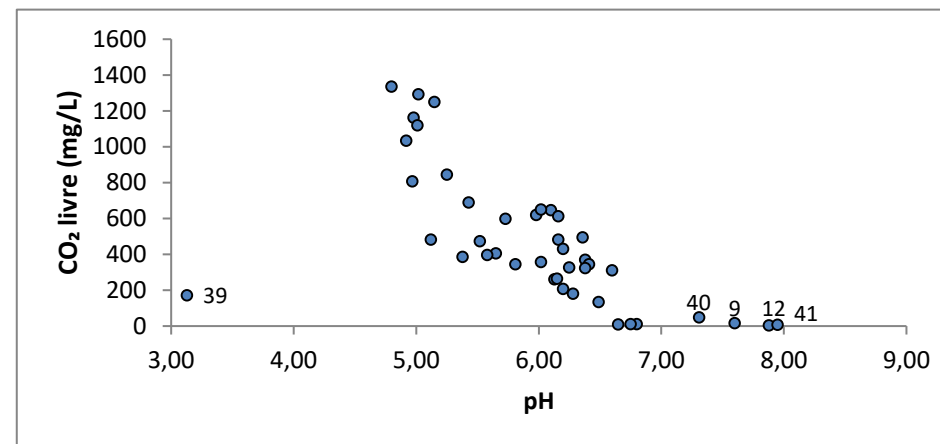


Figura 11.42 - Relação entre a concentração do CO_2 livre e o pH das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

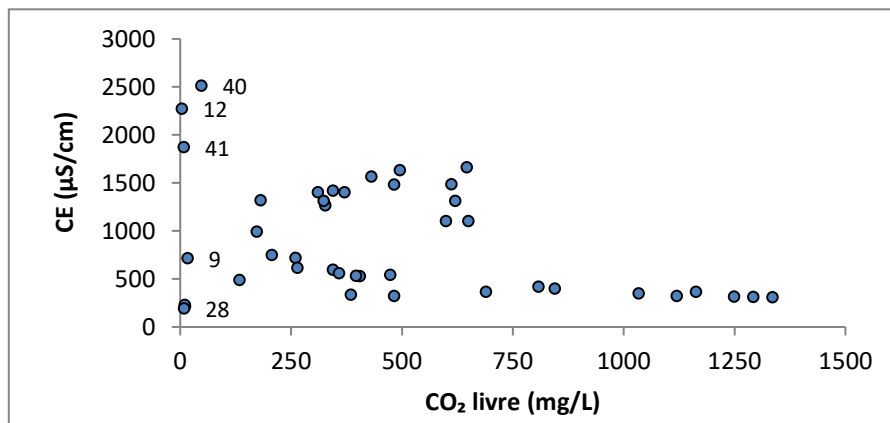


Figura 11.43 – Relação entre a Condutividade Elétrica e a concentração em CO_2 livre das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

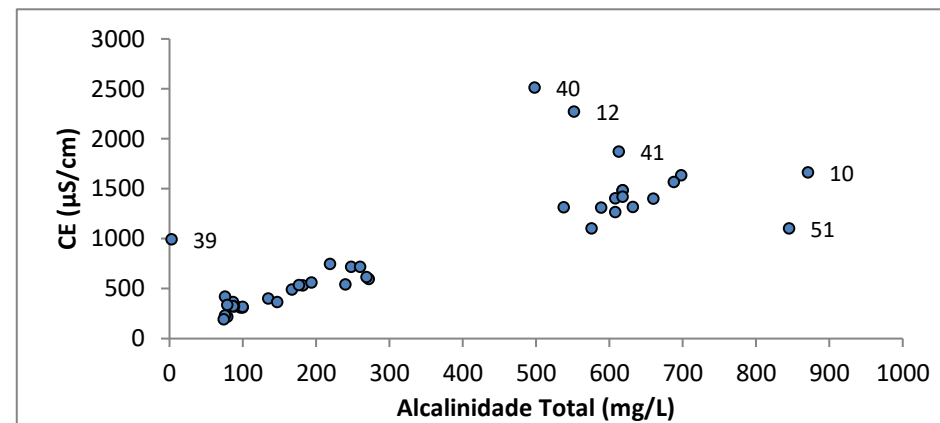


Figura 11.44 – Relação entre a Condutividade Elétrica (CE) e a Alcalinidade Total das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

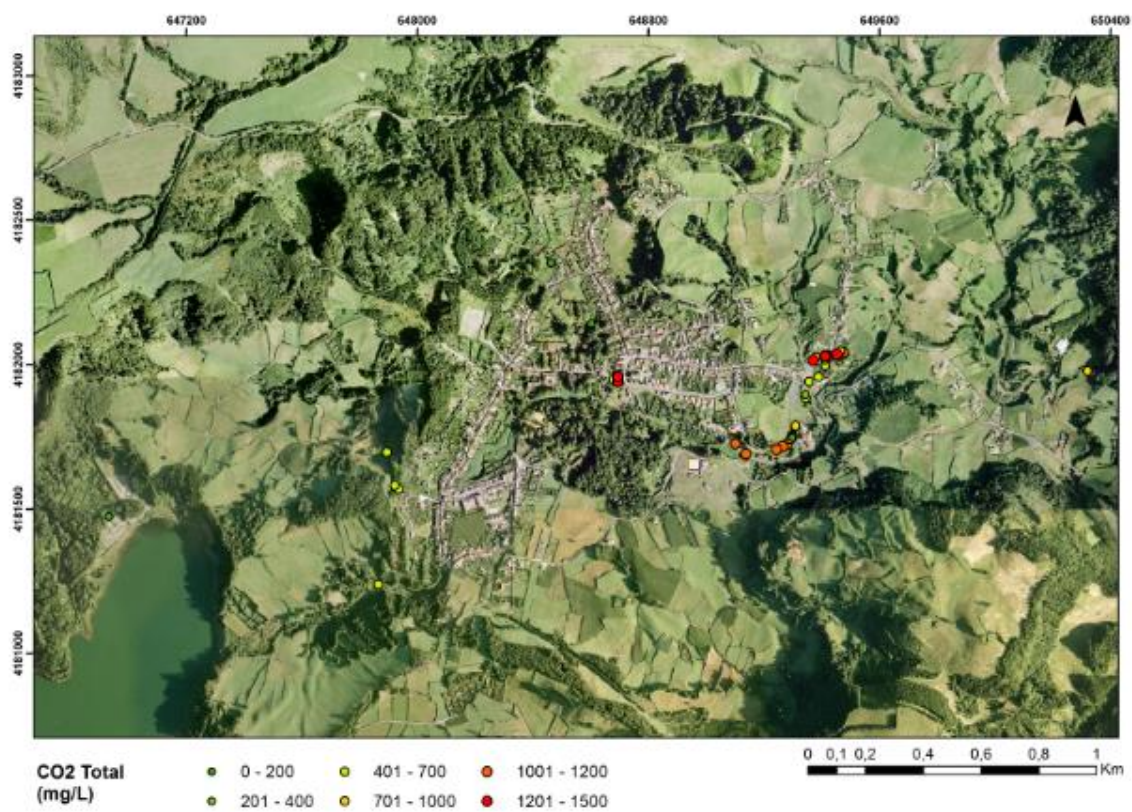


Figura 11.45 - Distribuição dos valores de CO₂ total calculados para as nascentes e fumarolas da Caldeira das Furnas (Base: Ortofoto SRCTE).

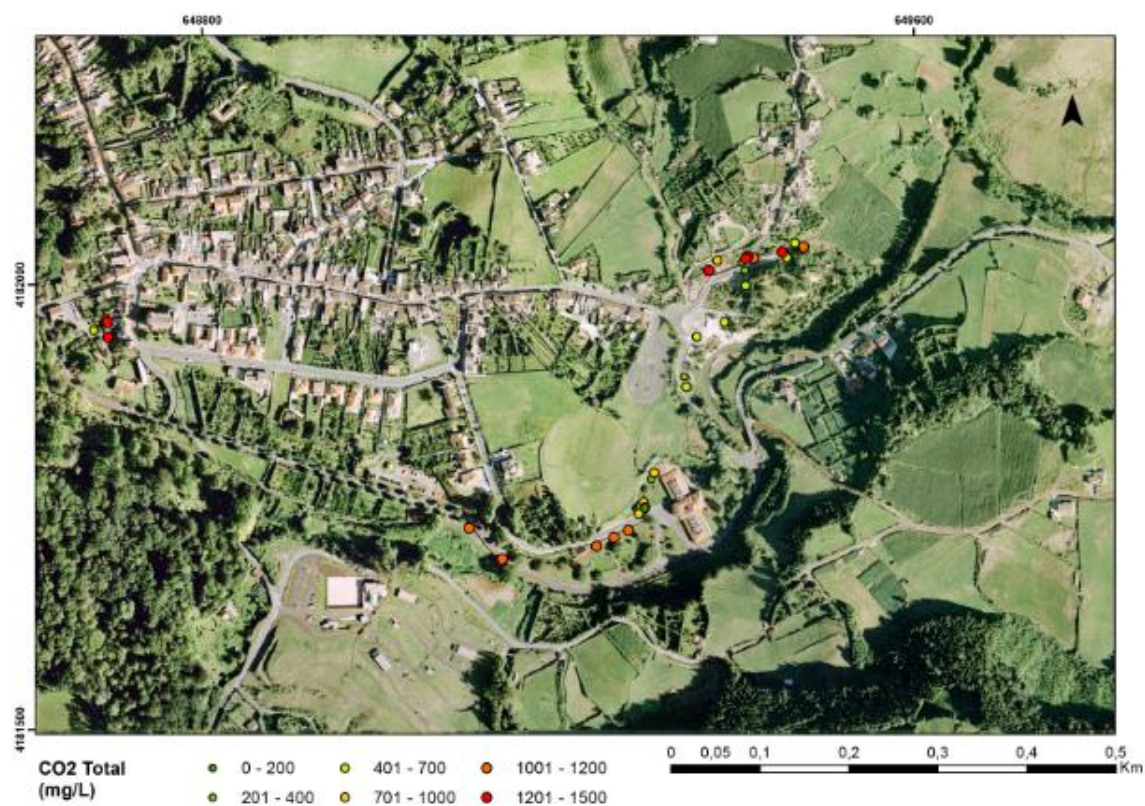


Figura 11.46 - Pormenor das zonas da Chã das Caldeiras, Jardim das Termas e Banhos Férreos (Base: Ortofoto SRCTE).

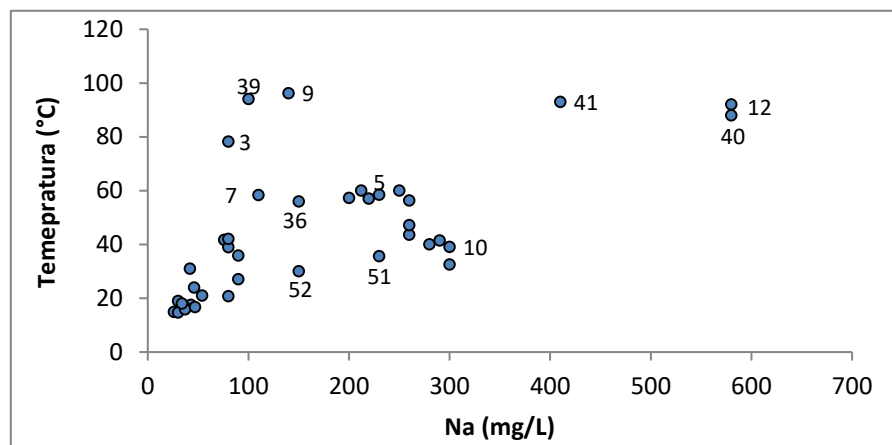


Figura 11.47 - Relação entre a temperatura das águas e a concentração em ião sódio nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

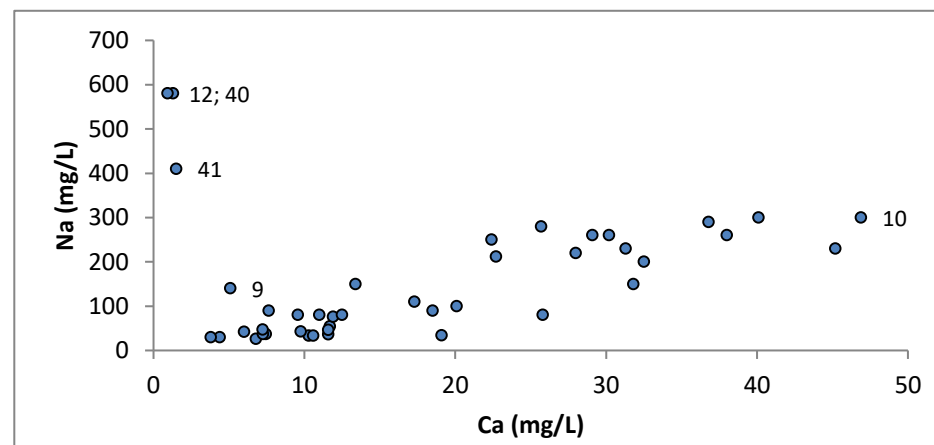


Figura 11.48 – Relação entre as concentrações dos iões cálcio e magnésio nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

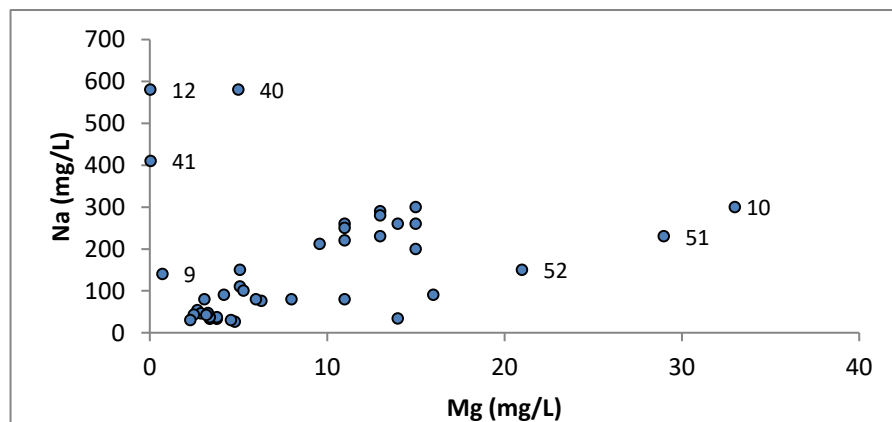


Figura 11.49 – Relação entre magnésio e sódio dissolvidos nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

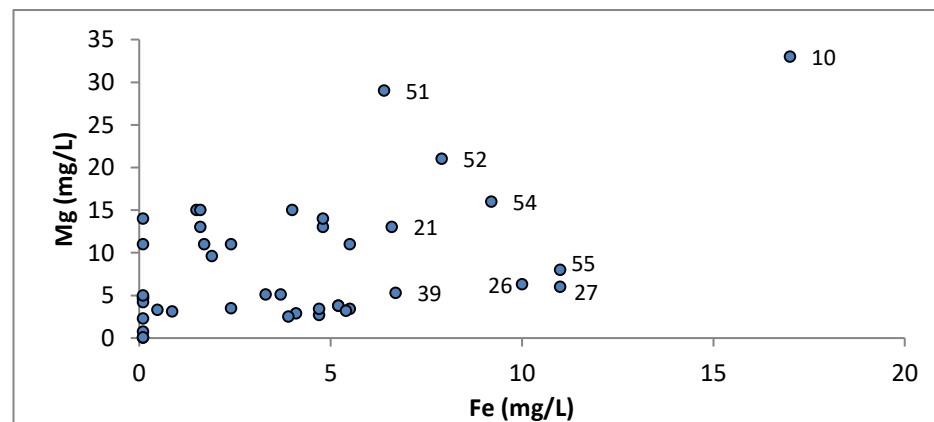


Figura 11.50 – Relação entre a concentração de ferro e magnésio nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

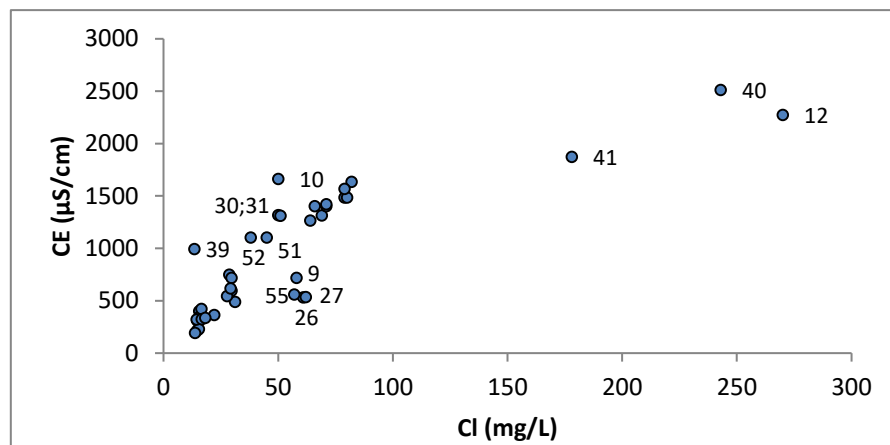


Figura 11.51 – Relação entre a Condutividade Elétrica (CE) e o cloreto nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

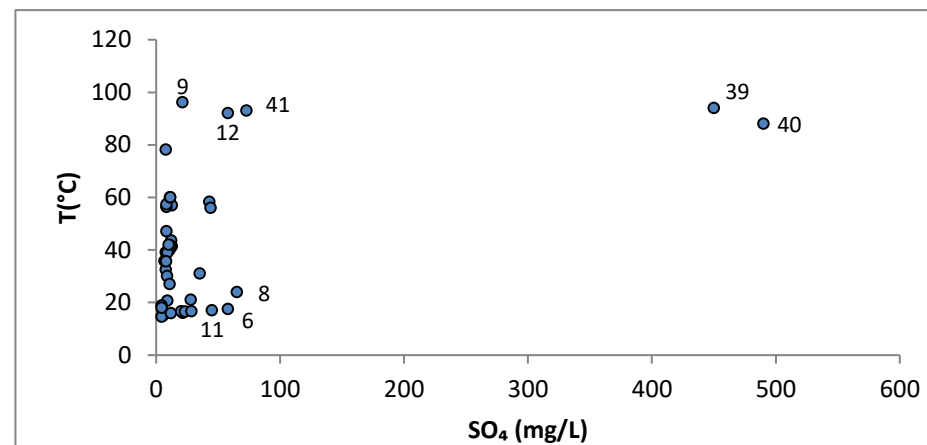


Figura 11.52 – Relação entre a temperatura e a concentração de sulfato nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

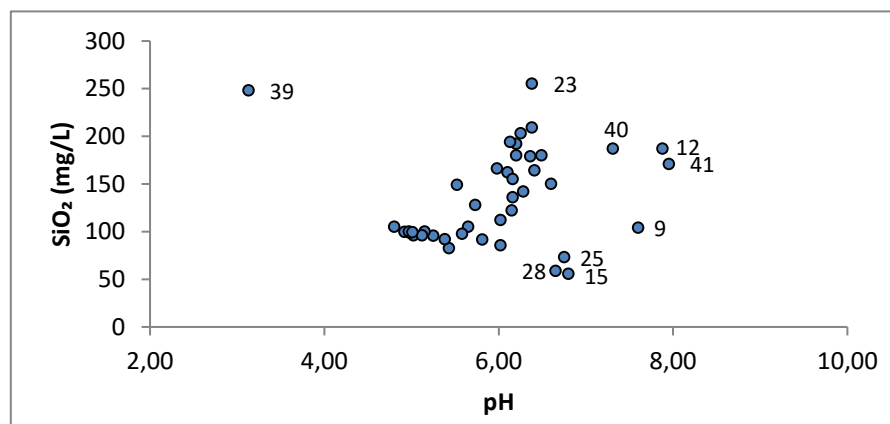


Figura 11.53 – Relação entre a sílica dissolvida e o pH das águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

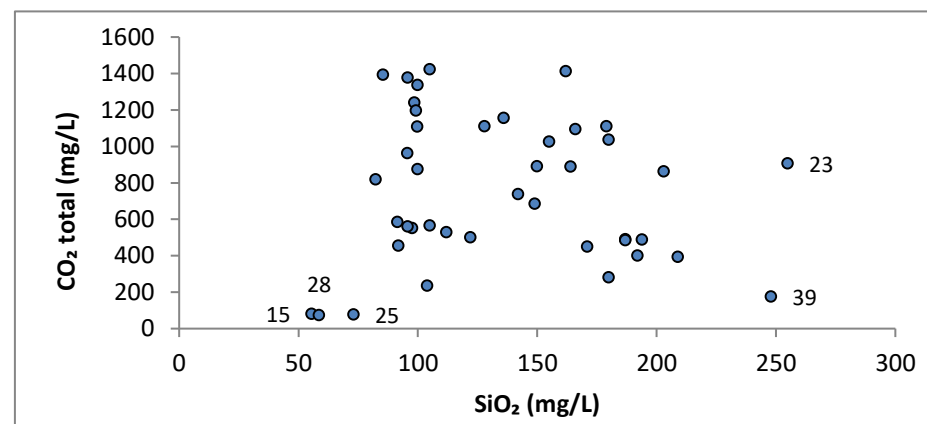


Figura 11.54 - Relação entre a sílica dissolvida e o CO_2 total nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

ANEXO 6 – EQUILÍBRIOS QUÍMICOS/ÍNDICES DE SATURAÇÃO

Quadro 11.13 – Indicação de sobressaturação (+), subsaturação (-) ou equilíbrio (o) das águas amostradas no Vulcão das Furnas face às espécies minerais consideradas.

Amostra	Designação	Calcedónia	Cristobalite	Quartzo	Silicagel	SiO ₂ (a)	Clinoenstatite	Diópsido	Calcite	Dolomite	Siderite	Fluorite	Forsterite
1	Água Azeda do Rebentão	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
2	Água Azeda	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
3	Caldeirão do Chalet	+	+	+	o	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Miguel Henriques	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Quenturas	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
6	Chalet Frio - Banhos	+	+	+	+	o	-	-	-	-	-	-	-
7	Padre José	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-
8	Água da Prata	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
9	Bica da Água Santa	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-
10	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação I	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
11	Chalet Frio	+	+	+	+	o	-	-	-	-	-	-	-
12	Caldeira Grande	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	Pimentel e Castro	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
14	Dr. José Bruno	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Gloria Patri	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
16	Grutinha	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-
17	Grutinha II	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
20	Morangueira	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
21	Torno	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
22	Rego	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
23	Três Bicas - Centro	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
24	Três Bicas - Direita	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-
25	Três Bicas - Esquerda	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
26	Ribeira de Nossa Senhora	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
27	Poça da Dona Beija	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
28	Fonte da Camarça	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-

29	Poço	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
30	Encosta - Direita	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
31	Encosta - Esquerda	+	+	+	+	o	-	-	-	-	-	-	-
32	Tio José de Sousa	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
33	Rego (ou Água das Misturas)	+	+	+	+	o	-	-	-	-	-	-	-
34	Sanguinhal	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
35	Água do Vale de Alcântara	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
36	Padre José (casa de chá)	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-
39	Caldeira da Lagoa das Furnas	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
40	Caldeira do Asmodeu	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	Caldeira do Esguicho	+	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	-
42	Caldeira dos Vimes	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
51	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação IV	+	+	+	+	-	-	-	-	-	+	-	-
52	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação V	+	+	+	+	o	-	-	-	-	-	-	-
54	Cabaço II	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	-	-
55	Ribeira de Nossa Senhora II	+	+	+	+	o	-	-	-	-	+	-	-

Quadro 11.14 – Indicação de sobressaturação (+), subsaturação (-) ou equilíbrio (o) das águas amostradas no Vulcão das Furnas face às espécies minerais consideradas.

ID Amostra	Designação	Anortite	Albite	Microclina	Adulária	Montmorilonite-Ca	Caulinite	Illite	Analcite
1	Água Azeda do Rebentão	-	-	+	-	+	+	-	-
2	Água Azeda	-	-	+	-	+	+	-	-
3	Caldeirão do Chalet	-	-	+	+	+	+	+	-
4	Miguel Henriques	-	-	+	-	+	+	-	-
5	Quenturas	-	-	+	+	+	+	+	-
6	Chalet Frio - Banhos	-	-	+	-	+	+	-	-
7	Padre José	-	-	+	+	+	+	+	-
8	Água da Prata	-	-	+	-	+	+	+	-
9	Bica da Água Santa	-	-	+	-	-	-	-	-
10	Água Férrea I	-	-	+	+	+	+	+	-
11	Chalet Frio	-	-	+	-	-	+	-	-
12	Caldeira Grande	-	-	+	+	-	+	-	-
13	Pimentel e Castro	-	-	+	-	+	+	-	-
14	Dr. José Bruno	-	-	+	-	-	+	-	-
15	Gloria Patri	-	-	+	+	+	+	+	-
16	Grutinha I	-	-	+	+	+	+	+	-
17	Grutinha II	-	-	+	+	+	+	-	-
20	Morangueira	-	-	+	+	+	+	+	-
21	Torno	-	-	+	+	+	+	+	-
22	Rego	-	-	+	+	+	+	+	-
23	Três Bicas - Centro	-	+	+	+	+	+	+	-
24	Três Bicas - Direita	-	-	+	+	+	+	+	-
25	Três Bicas - Esquerda	-	+	+	+	+	+	+	-
26	Ribeira Nossa Senhora	-	-	+	-	-	+	-	-
27	Poça da Dona Beija	-	-	+	-	-	+	-	-
28	Fonte da Camarça	-	-	+	+	+	+	+	-
29	Poço	-	-	+	+	+	+	+	-
30	Encosta - Direita	-	-	+	+	+	+	+	-

*AM-31 a AM-55 sem alumínio na análise

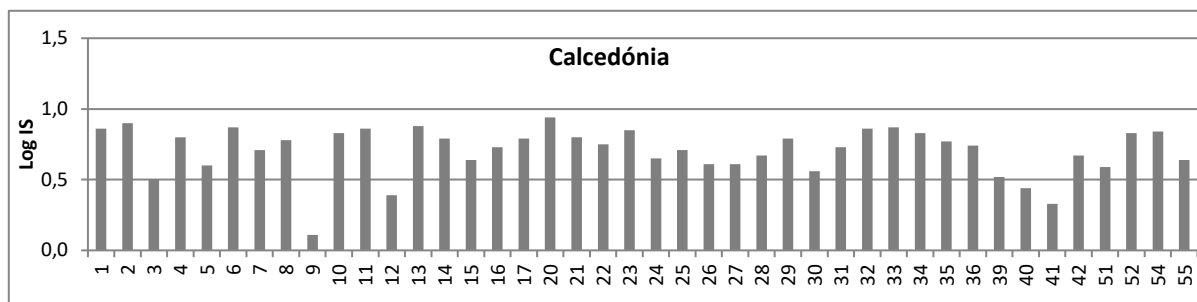


Figura 11.55 – Valores de Log IS por ponto de amostragem para calcedónia.

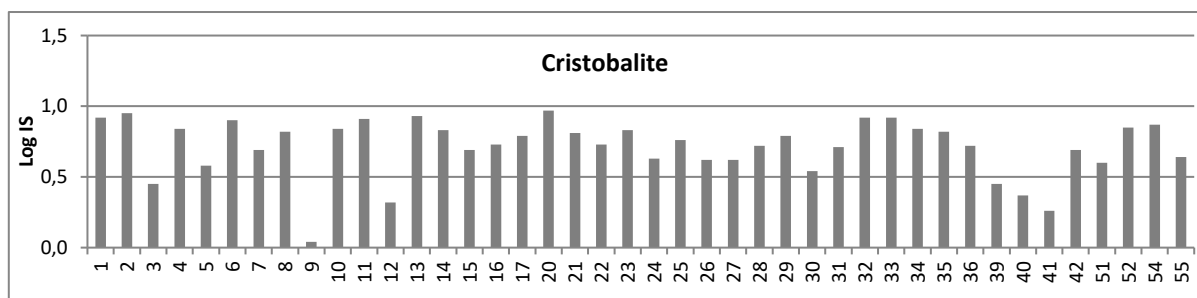


Figura 11.56 – Valores de Log IS por ponto de amostragem para cristobalite.

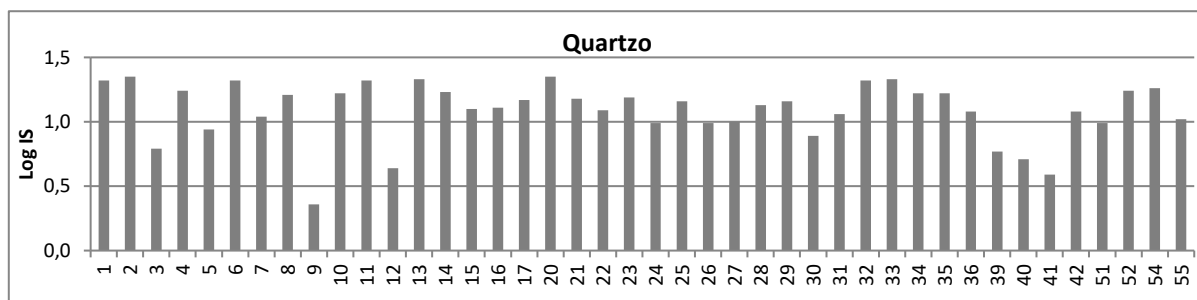


Figura 11.57 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para o quartzo.

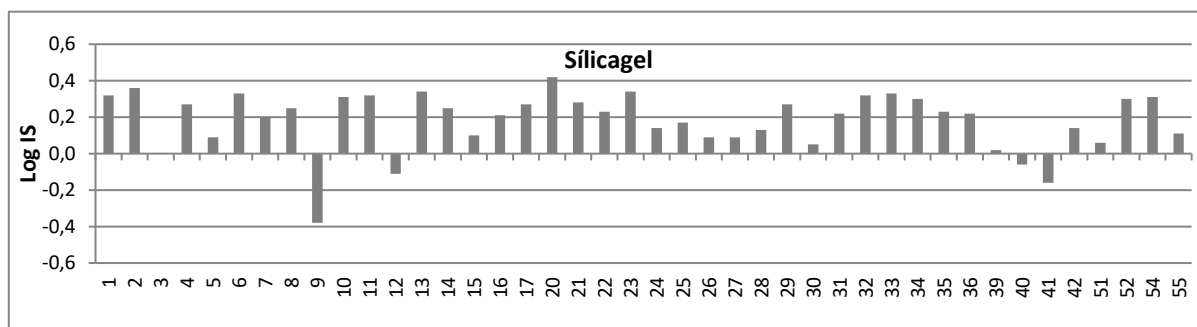


Figura 11.58 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para sílicagel.

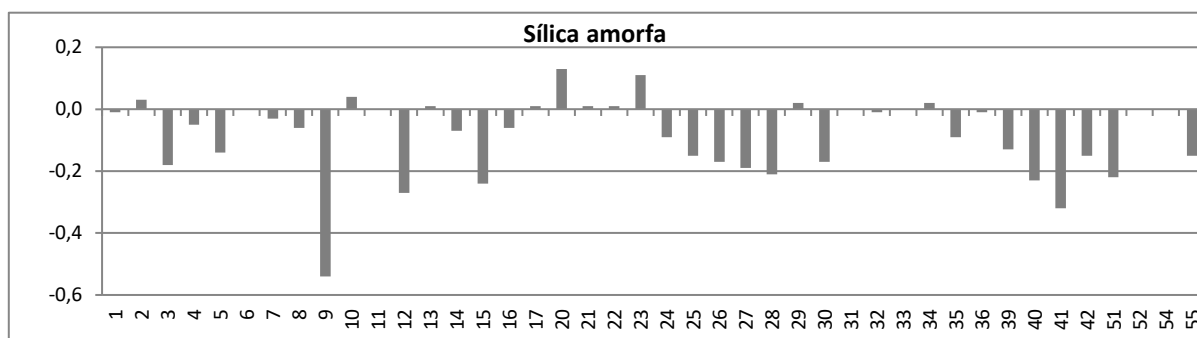


Figura 11.59 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para sílica amorfa ($\text{SiO}_{2(a)}$).

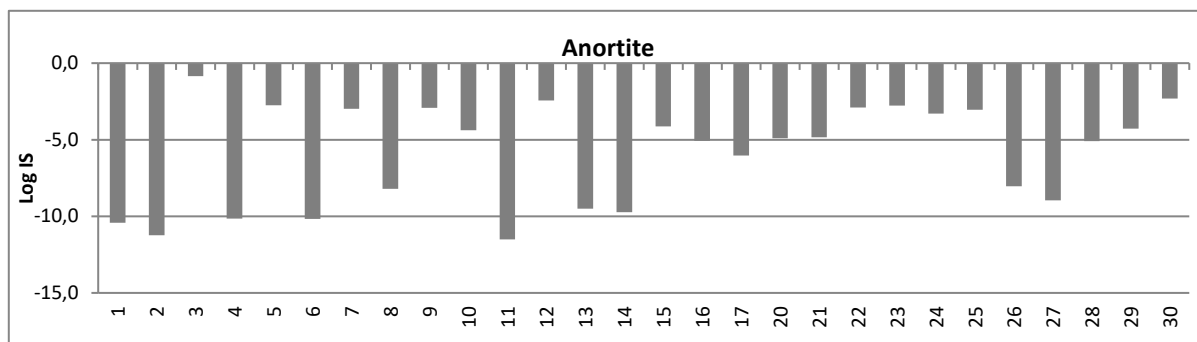


Figura 11.60 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para anortite.

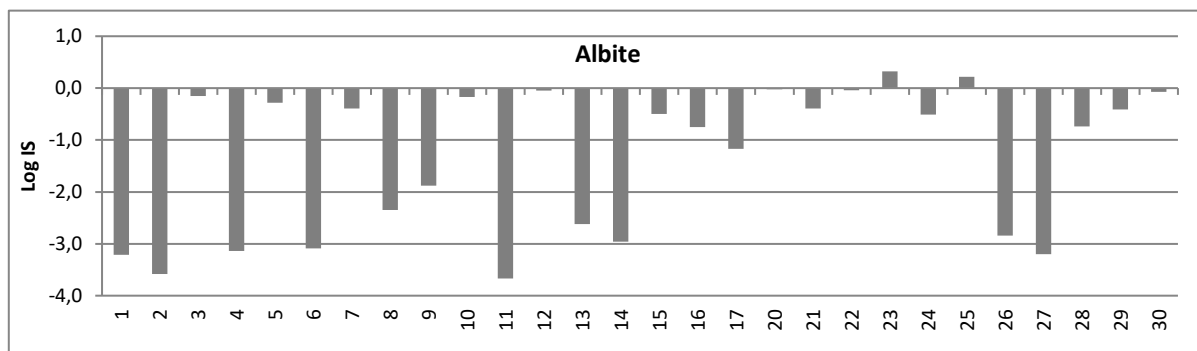


Figura 11.61 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para albite.

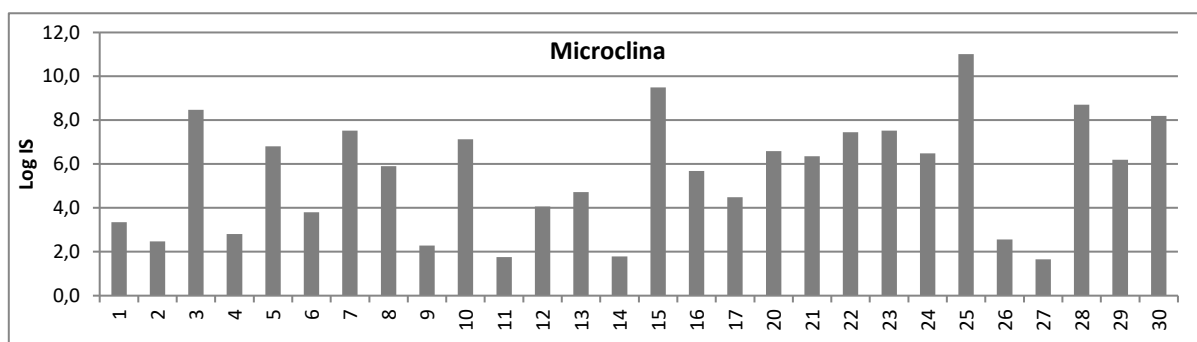


Figura 11.62 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para microclina.

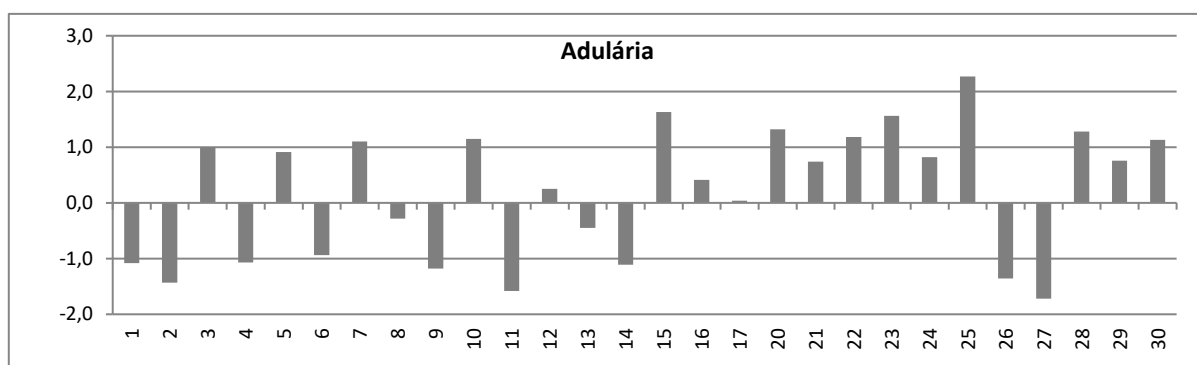


Figura 11.63 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para adulária.

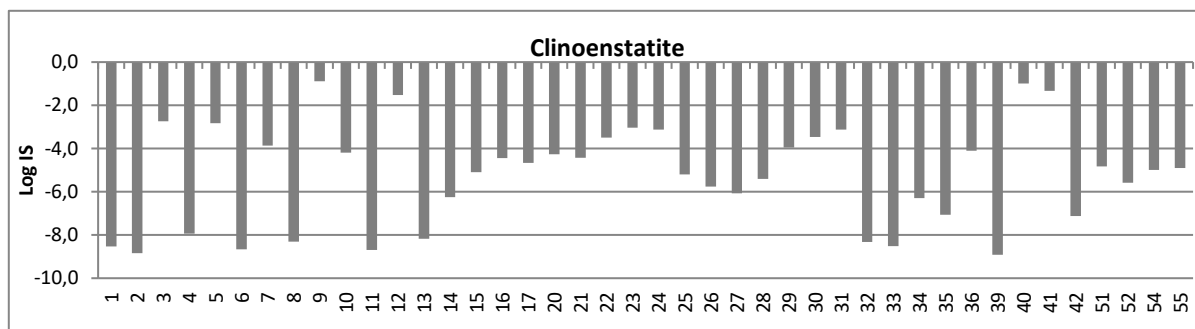


Figura 11.64 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para clinoenstatite.

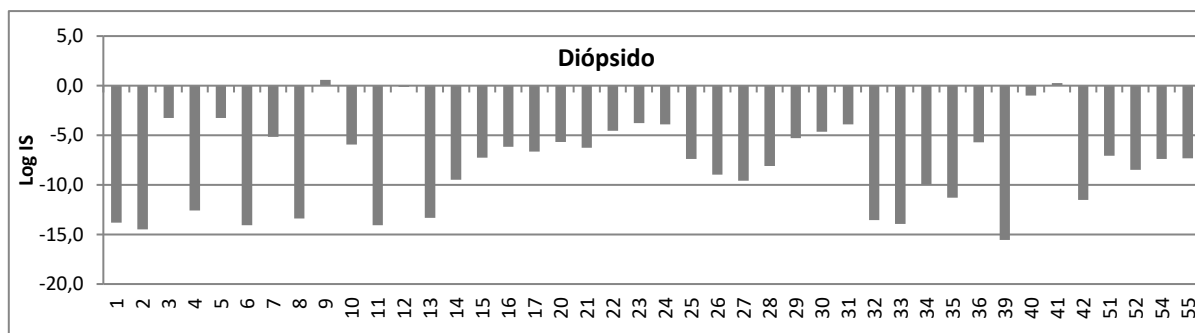


Figura 11.65 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para diópsido.

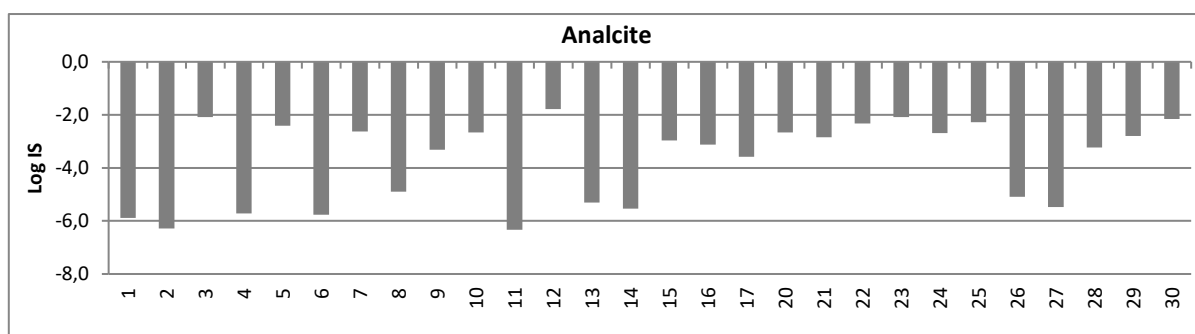


Figura 11.66 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para analcite.

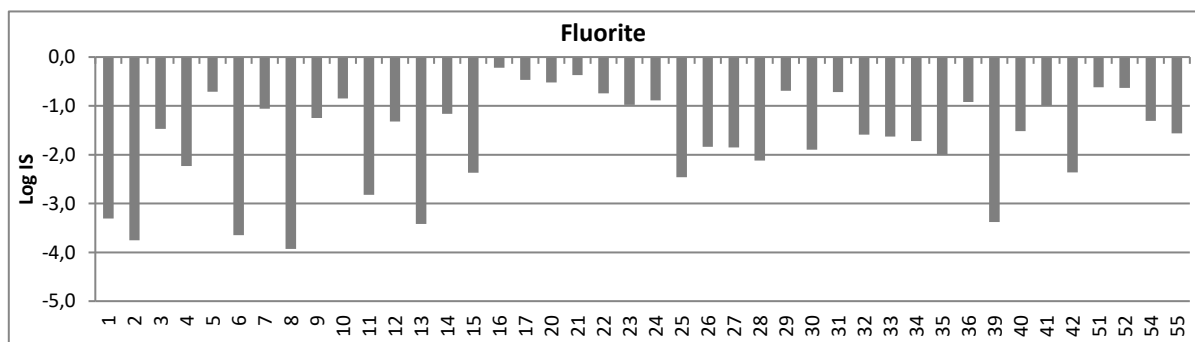


Figura 11.67 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para fluorite.

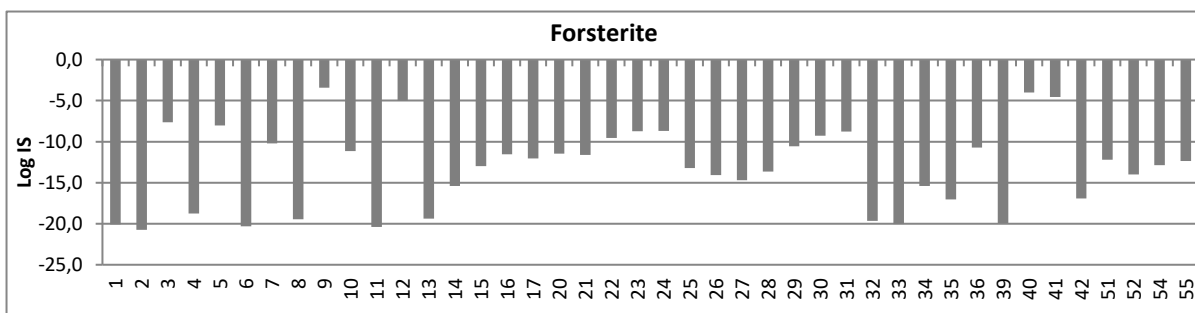


Figura 11.68 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para forsterite.

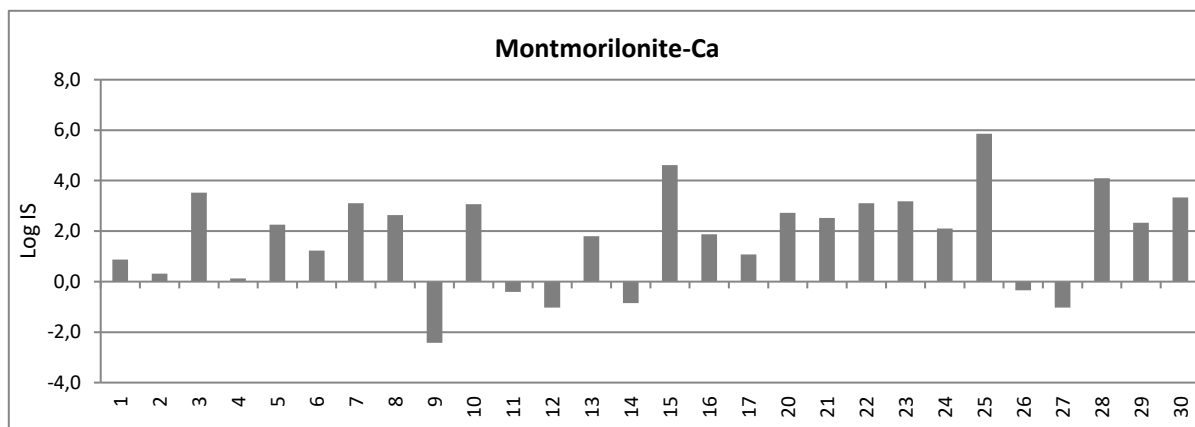


Figura 11.69 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para montmorilonite-Ca.

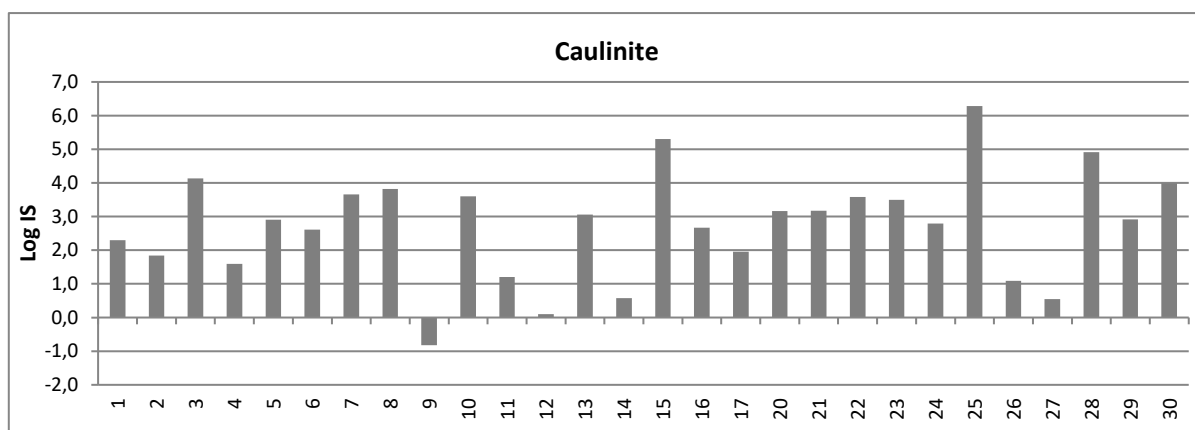


Figura 11.70 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para caulinite.

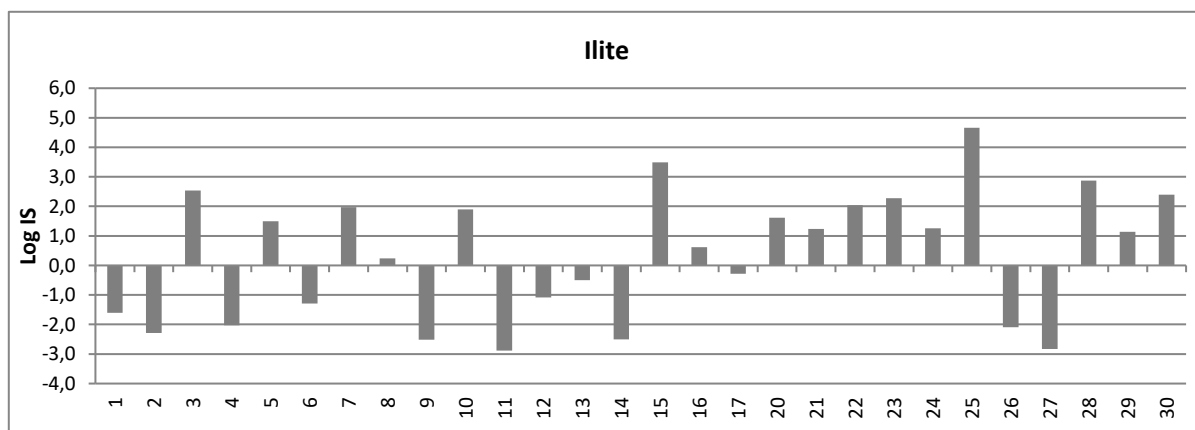


Figura 11.71 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para illite.

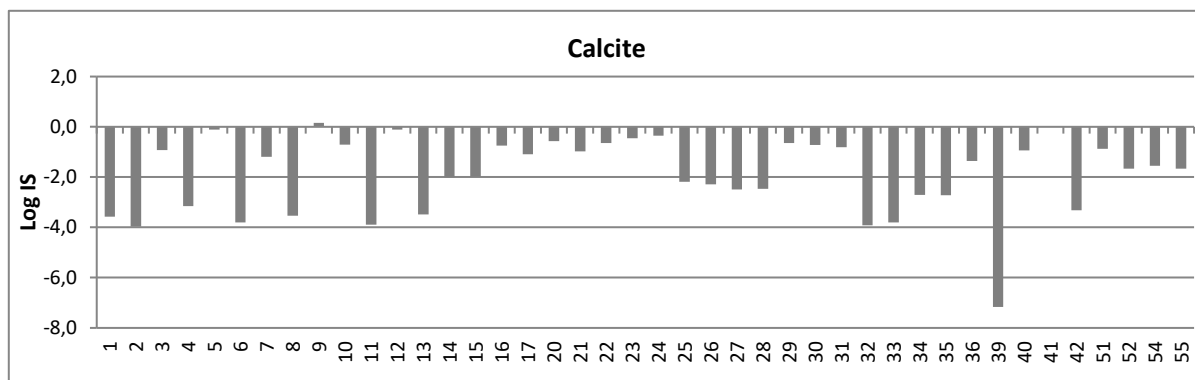


Figura 11.72 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para calcite.

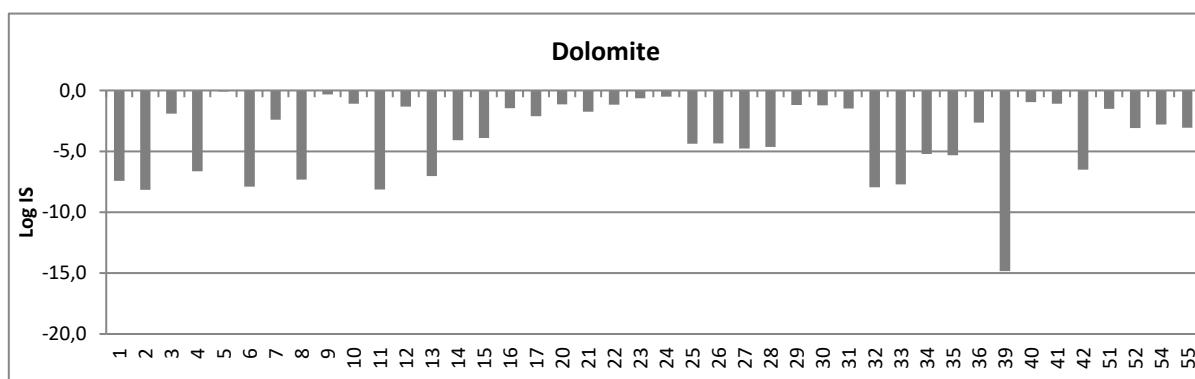


Figura 11.73 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para dolomite.

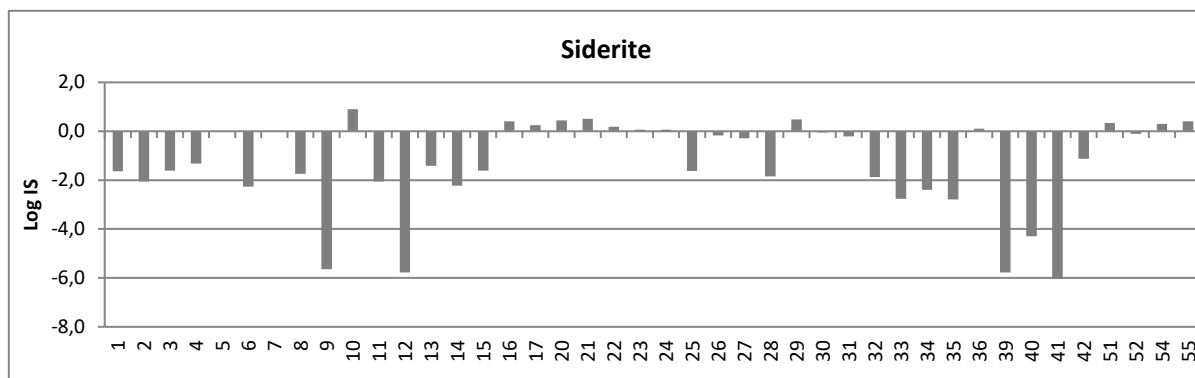


Figura 11.74 - Valores de Log IS por ponto de amostragem para siderite.

**ANEXO 7 – CLASSIFICAÇÃO DOS PONTOS DE ÁGUA AMOSTRADOS NO VULCÃO
DAS FURNAS COM BASE NAS TIPOLOGIAS PROPOSTAS**

Quadro 11.15 - Classificação das águas amostradas no Vulcão das Furnas de acordo com a sua tipologia.

Amostra	Ponto de amostragem	Outras designações	Coordenadas WGS_84		Altitude (m)	Tipo
			M	P		
1	Água Azeda do Rebentão		649412,71	4182032,25	193	2
2	Água Azeda		649451,95	4182037,05	188	2
3	Caldeirão do Chalet		649406,3	4182025,3	190	3
4	Miguel Henriques		649368,38	4182015,73	191	2
5	Quenturas	Férrea das Quenturas	649295,96	4181756,05	191	3
6	Chalet Frio - Banhos		649420,05	4182030,56	192	2
7	Padre José		649341,99	4181896,98	192	3
8	Água da Prata		649369,45	4182016,17	191	2
9	Bica da Água Santa		649410,13	4182016,48	189	4
10	Água Férrea I	ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos/Banhos Velhos I	648694,23	4181941,55	194	3
11	Chalet Frio		649378,78	4182027,63	192	2
12	Caldeira Grande		649355,71	4181942,06	197	4
13	Pimentel e Castro		649410,80	4182029,64	191	2
14	Dr. José Bruno		648678,02	4181949,06	194	2
15	Gloria Patri		648461,50	4182352,53	205	1
16	Grutinha I	ou Ernesto Correia	649279,09	4181724,46	187	3
17	Grutinha II		649262,88	4181716,75	187	3
18	Lagoa das Furnas 1		647003,00	4181421,00	281	6
19	Lagoa das Furnas 2		647372,00	4179545,00	287	6
20	Morangueira		649136,99	4181692,02	187	3
21	Torno		649243,09	4181706,87	187	3
22	Rego		649291,24	4181742,98	187,5	3
23	Três Bicas - Centro		649297,78	4181749,64	188	3
24	Três Bicas - Direita		649298,12	4181750,72	188	3
25	Três Bicas-Esquerda		649297,13	4181749,06	188	1
26	Ribeira de Nossa Senhora	Terra Nostra I	647922,83	4181578,41	210	3
27	Poça da Dona Beija	Terra Nostra II	647934,47	4181569,42	210	3
28	Fonte da Camarça		648599,95	4182143,04	197	1
29	Poço		649100,22	4181727,08	187	3
30	Encosta - Direita		649308,01	4181788,99	194	3
31	Encosta - Esquerda		649304,99	4181781,99	194	3
32	Tio José de Sousa		649465,99	4182047,09	193	2
33	Água do Rego	ou Misturas	649475,78	4182043,14	186	2
34	Sanguinhal		647864,02	4181240,02	230	3
35	Água do Vale de Alcântara		650319,99	4181978,98	195	2
36	Padre José (casa de chá)		649343,83	4181885,76	192	3
37	Água da Helena		648694,46	4182288,44	202	2 ¹
38	Serra do Trigo		650247,39	4182083,05	198	2
39	Caldeira da Lagoa das Furnas		646932,41	4181475,19	283	5
40	Caldeira do Asmodeu		649387,14	4181958,21	195	4

41	Caldeira do Esguicho		649410,95	4181999,54	191	4
42	Caldeira dos Vimes		649457,43	4182030,75	186	3
43	Caldeiras Barrentas		649357,51	4181953,77	198	n.a.
44	Caldeira Pequena		649349,57	4181956,94	198	n.a.
45	Caldeira de Pero Botelho ou das Lamas		649407,99	4181972,6	195	n.a.
46	Caldeiras Secas 1		649350,52	4181960,22	198	n.a.
47	Caldeiras Secas 2		649344,28	4181953,24	198	n.a.
48	Caldeiras Secas 3		649350,84	4181952,6	198	n.a.
49	Água Férrea II	ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos/Banhos Velhos II	648696,01	4181937,68	194	3 ²
50	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação III	ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos/Banhos Velhos III	648697,04	4181935,14	194	3 ²
51	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação IV	ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos/Banhos Velhos IV	648693,51	4181958,32	194	3
52	Água Férrea ou Banhos da Câmara da Povoação V	ou Banhos da Câmara da Povoação/Banhos Férreos/Banhos Velhos V	648691,93	4181960,7	194	3
53	Cabaço ³		647873,00	4181685,00	226,5	3
54	Cabaço II		647894,23	4181698,17	220	3
55	Ribeira de Nossa Senhora II		647921,46	4181582,89	208	3
56	Ribeira de Nossa Senhora III		647919,35	4181586,28	208	3
57	Ribeira de Nossa Senhora IV		647923,79	4181586,28	208	3
58	Poço da Água Férrea	Localização atual desconhecida				
59	Rego II		649294,15	4181746,36	188	3

Tipologia: (1) – Águas frias; (2) – Águas frias gasocarbónicas; (3) – Águas termais ácidas; (4) – Águas termais básicas; (5) – Condensado de Fumarola; (6) – Massa de água superficial (Lagoa das Furnas); (n.a.) – Não amostrado.

¹ - Classificação baseada em dados analíticos do projeto HYDROVULC, *in* FREIRE (2006).

² - Classificação baseada em dados analíticos (de 2015) fornecidos pelo INOVA.

³ - Classificação baseada em análise de CARVALHO, A. (1955); Coordenadas e altitude: projeto HYDROVULC (*in* FREIRE, 2006)

ANEXO 8 – DADOS ISOTÓPICOS

Quadro 11.16 - Composição isotópica das águas analisadas, com indicação dos valores dos principais parâmetros de campo.

ID Amostra	Designação	Isótopos (‰)		Temperatura (°C)	pH	Condutividade (µS/cm)
		$\delta^{18}\text{O}$	δD			
AM-01	Água Azeda do Rebentão	-3,90	-19,3	16,00	5,02	310,2
AM-02	Água Azeda	-4,00	-18,3	16,60	4,80	308,8
AM-03	Caldeirão do Chalet	-3,40	-15,4	78,20	6,49	488,3
AM-04	Miguel Henriques	-4,00	-17,7	21,00	5,25	399,0
AM-05	Quenturas	-3,50	-14,8	58,50	6,60	1400,0
AM-06	Chalet Frio - Banhos	-3,90	-17,1	17,00	4,92	348,0
AM-07	Padre José	-3,70	-16,3	58,30	6,20	745,9
AM-08	Água da Prata	-3,90	-18,3	23,90	4,98	364,5
AM-09	Bica da Água Santa	-2,50	-10,5	96,20	7,60	715,0
AM-10	Água Férrea I	-3,80	-17,2	39,00	6,10	1660,0
AM-11	Chalet Frio	-3,90	-19,0	17,70	4,60	363,3
AM-12	Caldeira Grande	0,80	-0,4	92,20	7,45	2284,0
AM-13	Pimentel e Castro	-4,00	-18,3	16,50	5,15	314,4
AM-14	Dr. José Bruno	-3,60	-15,1	20,70	5,81	594,8
AM-15	Gloria Patri	-4,00	-17,6	14,90	6,80	214,7
AM-16	Grutinha I	-3,30	-14,3	41,40	6,16	1483,0
AM-17	Grutinha II	-3,40	-13,4	43,60	5,98	1312,0
AM-18	Lagoa das Furnas 1	-2,30	-7,6	20,20	6,45	215,0
AM-19	Lagoa das Furnas 2	-2,10	-8,4	17,10	8,19	145,4
AM-20	Morangueira	-3,10	-12,9	32,50	6,36	1632,0
AM-21	Torno	-3,10	-14,6	40,00	6,16	1482,0
AM-22	Rego	-3,50	-15,7	56,90	6,25	1264,0
AM-23	Três Bicas - Centro	-3,50	-15,6	56,30	6,38	1401,0
AM-24	Três Bicas - Direita	-3,60	-16,0	57,30	6,41	1418,0
AM-25	Três Bicas - Esquerda	-4,00	-18,0	18,90	6,75	227,5
AM-26	Ribeira de Nossa Senhora	-3,00	-12,5	41,70	5,65	528,8
AM-27	Terra Nostra II	-2,80	-11,5	38,90	5,58	532,0
AM-28	Fonte da Camarça	-3,86	-21,1	14,60	6,65	191,2
AM-29	Poço	-3,19	-14,1	47,10	6,20	1565,0
AM-30	Encosta - Direita	-3,64	-17,7	60,00	6,28	1316,0
AM-33 ¹	Água do Rego	-3,72	-19,6	16,10	4,86	279,0
AM-38 ²	Serra do Trigo	-4,40	-16,0	16,80	4,70	174,0
AM-40 ²	Caldeira do Asmodeu	2,80	6,5	93,20	7,75	2860,0

¹Dados de CRUZ & FRANÇA, 2006; ²Dados de FERREIRA & OSKARSSON, 1999

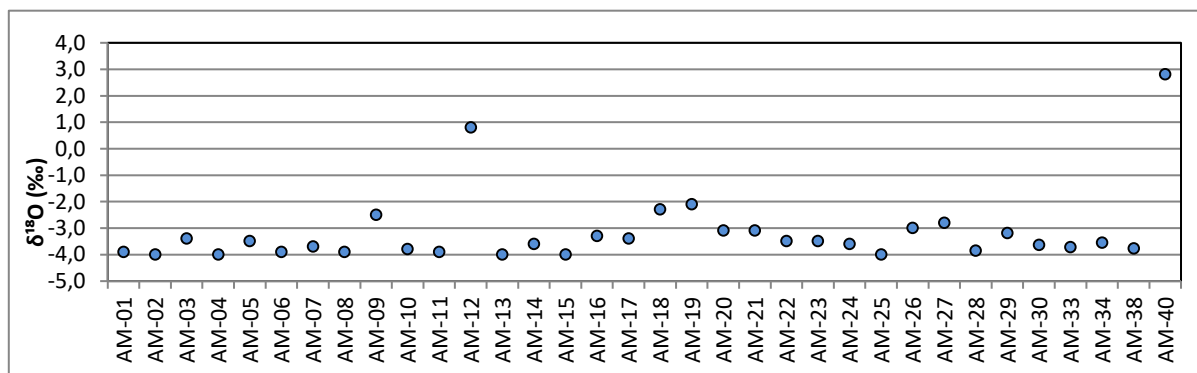


Figura 11.75 – Conteúdo em $\delta^{18}\text{O}$ das águas amostradas no Vulcão das Furnas.

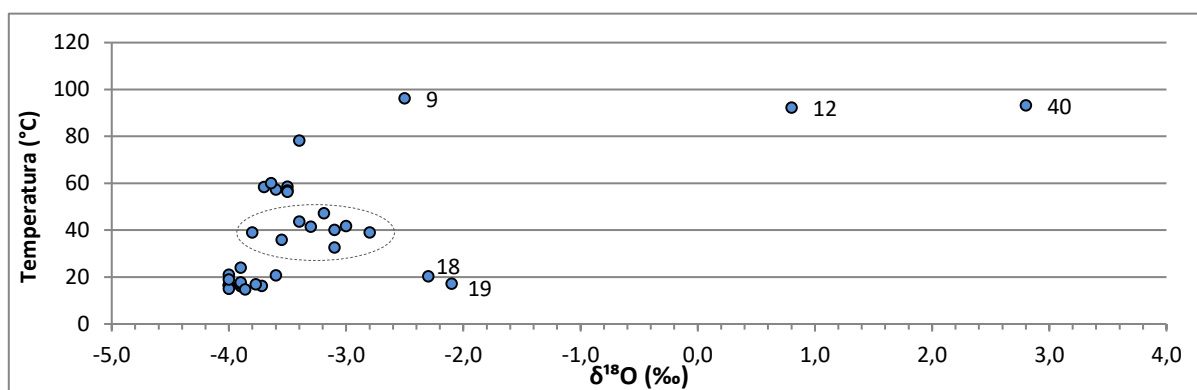


Figura 11.76 – Relação temperatura vs $\delta^{18}\text{O}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

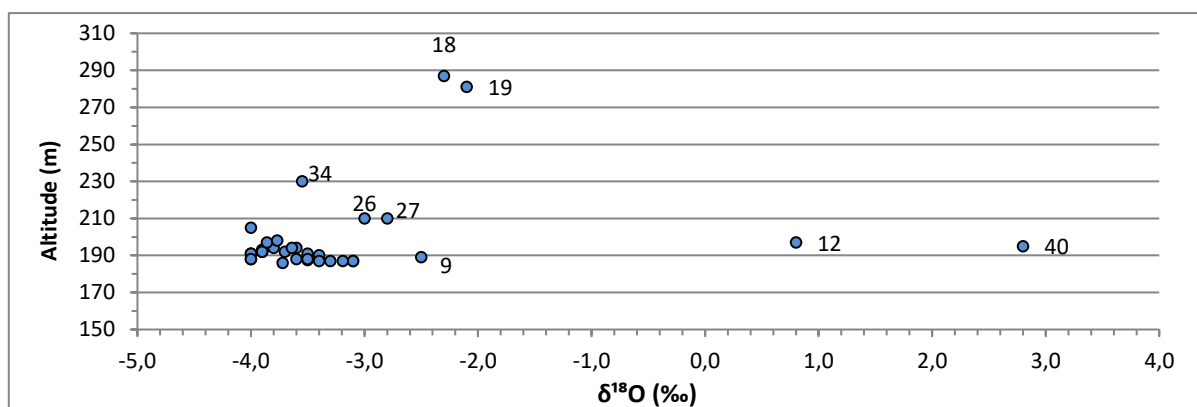


Figura 11.77 - Gráfico da variação de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) com a altitude nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

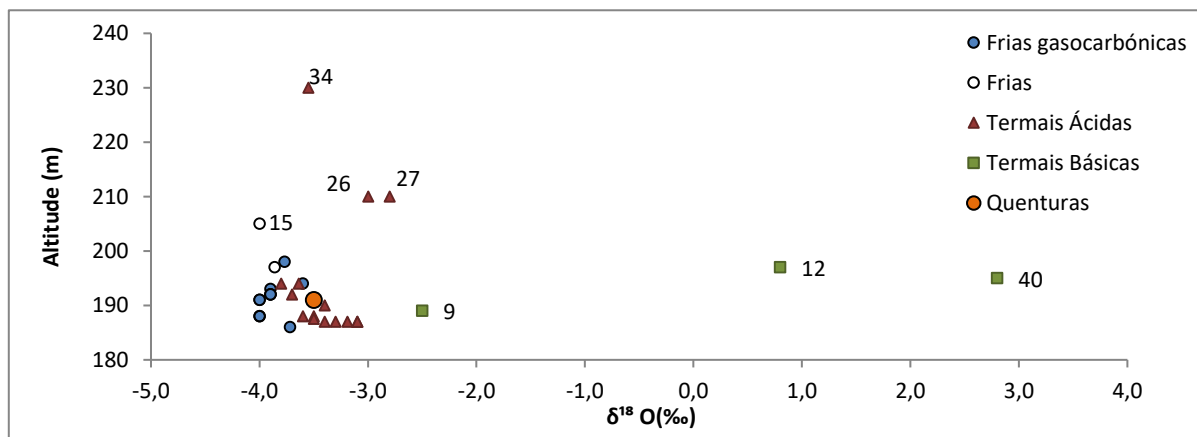


Figura 11.78 - Gráfico de pormenor da variação de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) com a altitude nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

Quadro 11.17 - Dados relativos às amostras de água de precipitação.

ID Amostra	Designação	Coordenadas UTM			Isótopos	
		M	P	Z	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)
1 - SC	Salto do Cavalo	651095	4183651	774	-3,94	-15,30
2 - PF	Pico do Ferro	646732	4181854	550	-3,32	-13,00
3 - LM	Lombo dos Milhos	647999	4180956	340	-2,63	-9,90
4 - FBH	Furnas Boutique Hotel	649360	4181794	200	-2,22	-9,00
5 - DM	Dream Mountain	649160	4182732	363	-2,60	-10,60
6 - AF	Achada das Furnas	646803	4182103	495	-3,39	-12,80

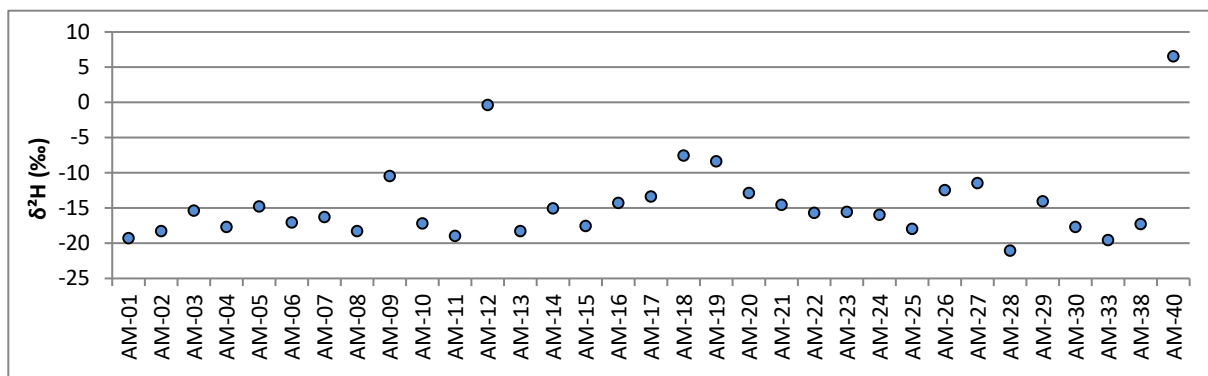


Figura 11.79 – Valores de $\delta^2\text{H}$ por ponto de amostragem.

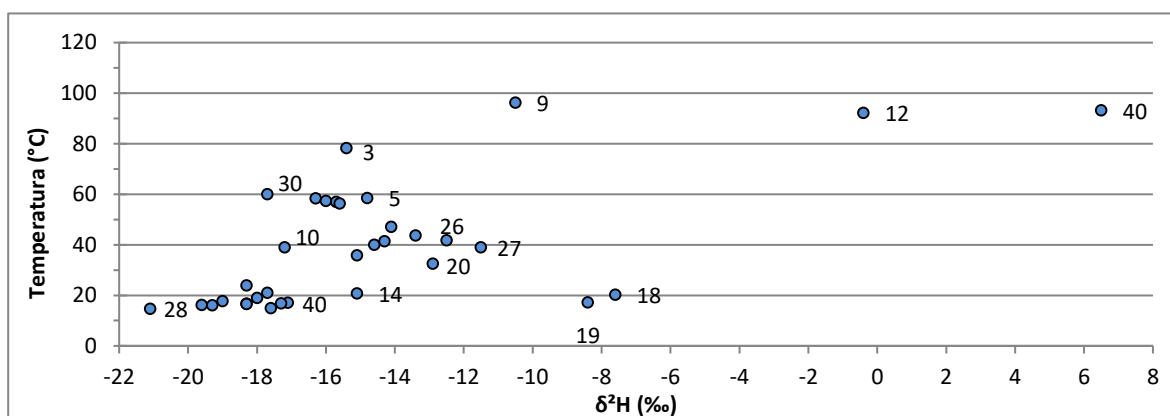


Figura 11.80 – Relação temperatura vs $\delta^2\text{H}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

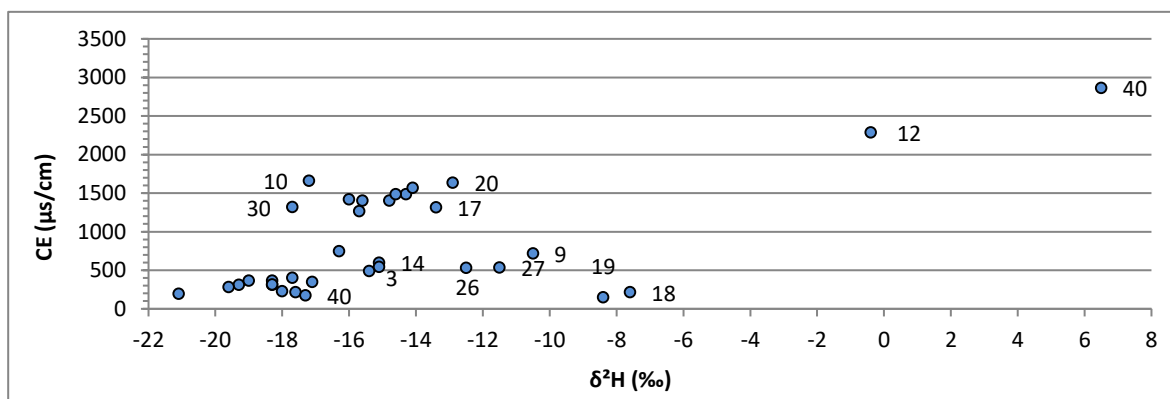


Figura 11.81 – Relação Condutividade Elétrica (CE) vs $\delta^2\text{H}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

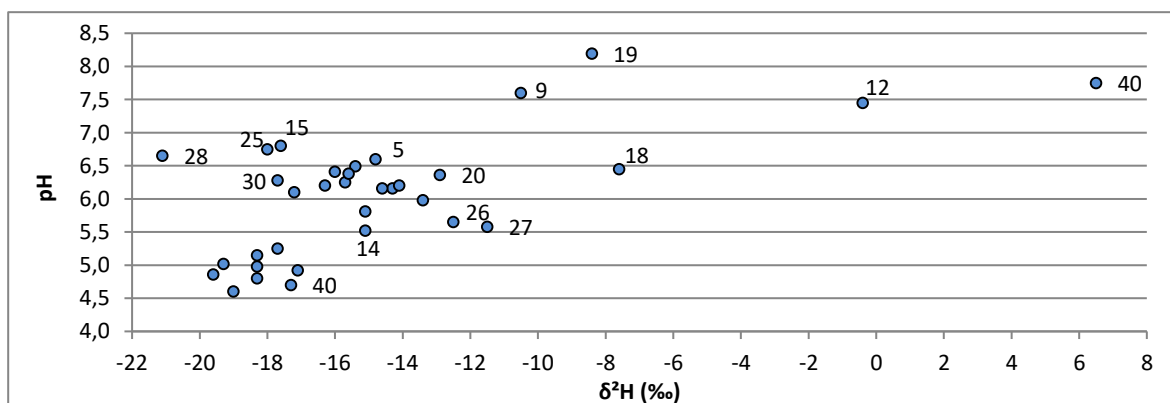


Figura 11.82 – Relação pH vs $\delta^2\text{H}$ nas águas subterrâneas amostradas no Vulcão das Furnas.

